

Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Porovnání řezných sil různých VBD

Comparsion of Cutting Forces Different VBD

Student:

Petr Bartošík

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Bartošík**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Porovnání řezných sil různých VBD**
Comparison of Cutting Forces Different VBD
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Faktory ovlivňující velikost řezných sil.
3. Návrh metodiky měření řezných sil.
4. Diskuze experimentů.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:


BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v tryskovém obrábění*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu

V Ostravě dne 20. května 2019



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019



.....

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Petr Bartošík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dubicko 7. května 193
789 72

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BARTOŠÍK, P. *Porovnání řezných sil různých VBD*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 54 s.

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Tato bakalářská práce je zaměřena na porovnání řezných sil a jejich složek u soustružnických geometrií aplikovaných na pozitivních destičkách. Úvodní část je zaměřena na popis obrábění, obráběného materiálu a řezného nástroje, který byl zvolen pro tento experiment, dále pak teorii tvorby třísky s ohledem na silové zatížení a popis metodiky a měřicího zařízení (dynamometru KISTLER). Praktická část se zabývá přímým srovnáním úrovně řezných sil a jejich složek pro jednotlivé utvařeče, které jsou rozděleny do třech vzájemně propojených podskupin dle aplikačních oblastí.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BARTOŠÍK, P. *The Comparision of cutting forces different VBD*. Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 54 p.

Thesis head: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

This bachelor thesis is focused on comparison of cutting forces and their components in turning geometries applied on positive plates. The introductory part focuses on the description, processing and processing of the material chosen for this experiment. The practical part deals with the direct comparison of the levels of cut forces and their components for individual applications, which are divided into linked subgroups according to application areas.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	7
ÚVOD.....	9
1. OBECNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU	10
1.1 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL	11
1.2 ŘEZNÉ NÁSTROJE.....	11
1.2.1 MATERIÁL - SLINUTÉ KARBIDY	14
1.2.2 VÝROBA VBD ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ	16
1.2.3 VÝROBA PRÁŠKU	16
1.2.4 LISOVÁNÍ SMĚSI	17
1.2.5 SLINOVÁNÍ DESTIČEK.....	19
1.2.6 ÚPRAVA NÁSTROJŮ PŘED POVLAKOVÁNÍM	20
1.3 POVLAKOVÁNÍ.....	21
1.3.1 METODA PVD	22
1.3.2 METODA CVD	23
2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VELIKOST ŘEZNÝCH SIL.....	24
2.1 GEOMETRIE NÁSTROJE.....	25
2.1.1 MAKROGEOMETRIE NÁSTROJE	25
2.1.2 MIKROGEOMETRIE NÁSTROJE	30
2.3 ŘEZNÉ PODMÍNKY	34
2.4 TEORIE TVORBY TŘÍSKY	34
2.5 TVORBA TŘÍSKY	37
2.6 MECHANICKÉ ZATÍŽENÍ, ŘEZNÉ SÍLY A JEJÍ SLOŽKY	38
3. NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL	40
3.1 MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL A JEJICH SLOŽEK	40
3.2 VOLBA DYNAMOMETRU	41
3.3 VOLBA OBRÁBĚCÍHO CENTRA	43
4. DISKUZE EXPERIMENTŮ	44
5. TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	50
6. ZÁVĚR	51
7. SEZNAM POŽITÉ LITERATURY.....	53

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Název	Jednotka
A α	Plocha hřbetu nástroje	[μm]
A γ	Plocha čela nástroje	[μm]
CVD	Chemická depozice vrstvy	[-]
ČSN	České technické normy	[-]
EN	Evropské normy	[-]
F	Síla řezání	[N]
F ₁	Aktivní složka síly řezání	[N]
F _{p/2}	Pasivní složka síly řezání	[N]
F _c	Řezná složka síly řezání	[N]
F _f	Posuvová složka síly řezání	[N]
F _n	Normálová síla	[N]
F _t	Třecí síla	[N]
F _{ok}	Okamžitá síla	[N]
HRC	Zkouška tvrdosti podle Rockwella	[-]
HSh	Zkouška tvrdosti podle Shoreho	[-]
K	Součinitel přechování třísky	[-]
KNB	Kubický nitrid boru	[-]
NO	Nástrojová ocel	[-]
O, M, N	Body ohraničující primární plastickou deformaci	[-]
P _f	Boční nástrojová rovina	[-]
P _n	Normálová nástrojová rovina	[-]
P _o	Ortogonální nástrojová rovina	[-]
P _p	Zadní nástrojová rovina	[-]
P _r	Základní nástrojová rovina	[-]
P _s	Nástrojová rovina ostří	[-]
PKD	Polykrystalický diamant	[-]
PKNB	Polykrystalický nitrid boru	[-]
PVD	Fyzikální depozice vrstvy	[-]
R	Řezný odpor	[N]
RO	Rychlořezné oceli	[-]

Značka	Název	Jednotka
S	Plocha průřezu třísky	[mm ²]
S ₁	Plocha vzniklé třísky	[mm ²]
ŘK	Řezná keramika	[-]
SK	Slinuté karbidy	[-]
S-N-O-(P)	Soustava - stroj, nástroj, obrobek, (přípravek)	[-]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
a	Tloušťka odebírané vrstvy	[mm]
a ₁	Tloušťka vzniklé třísky	[mm]
a _p	Hloubka řezu	[mm]
b _n	Velikost rovnoměrného zkosení na čelní ploše	[mm]
b _y	Velikost rovnoměrného zkosení na čelní ploše	[mm]
f	Posuv	[mm·ot ⁻¹]
l	Délka odebírané plochy	[mm]
l ₁	Délka vzniklé třísky	[mm]
m ₁	Hmotnost vzniklé třísky	[g]
r _ε	Poloměr zaoblení špičky nástroje	[mm]
v _{c;}	Řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
α _n	Úhel hřbetu nástroje v normálové rovině	[°]
β _n	Úhel břitu nástroje v normálové rovině	[°]
γ _n	Úhel čela nástroje v normálové rovině	[°]
λ _s	Úhel sklonu ostří	[°]
κ _r	Úhel nastavení hlavního ostří	[°]
ρ	Měrná hmotnost obráběného materiálu	[g·cm ⁻³]

ÚVOD

V dnešní době je největší důraz kladen především na vysokou kvalitu a životnost nástrojů, na minimální náklady pro výrobu a maximální produktivitu práce, a přitom musí být udržena konkurenceschopnost na trhu. Ke splnění těchto nároků je nutnost klást vysoké požadavky na proces řezání při obrábění a na samotný řezný nástroj. V místě řezu vznikají doprovodné zatěžující síly, které ovlivňují trvanlivost nástroje. Důležité je určení správného materiálu a parametrů pro řezný nástroj, vůči obráběnému materiálu, ale také zvolení správných řezných podmínek.

K vhodnému určení technologie obrábění je nutné znát velikost a typ řezných sil, které musí být pro soustavu S-N-O (stroj-nástroj-obrobek) co nejnižší. Tím lze dosáhnout snížení vibrací a zamezení velkého přenosu tepla z místa řezu do nástroje. V poslední době je měření řezných sil stále diskutovanější téma a existuje již mnoho experimentů. Díky tomu se zvyšuje šance na zvýšení produktivity, dosažení maximální trvanlivosti nástroje a na zlepšení jakosti povrchu obrobku.

Bakalářská práce je zpracována pro firmu Dormer Pramet s.r.o. Ta vznikla v roce 2014 sloučením dvou společností - Dormer Tools a Pramet Tools. Firma se specializuje na výrobu monolitních nástrojů a nástrojů jako jsou vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu pro různé obráběcí operace, především pro soustružení, frézování a vrtání. Nástroje zde prochází celým výrobním procesem od lisování substrátů, slinování, úpravy destiček (broušení, úpravy řezných hran) až po povlakování. V práci se jedná o porovnání řezných sil u geometrií utvařečů se stejnou nebo velmi podobnou aplikační oblastí. Utvářecí diagramy jednotlivých utvařečů fungují v podobných oblastech hloubek řezů a posuvů. Řezné síly jsou při obrábění jedním z nejdůležitějších aspektů, který přímo ovlivňuje životnost nástroje.

1. OBECNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU

OBRÁBĚNÍ

Obrábění je jedna z nejvýznamnějších technologií ve strojírenské výrobě. Díky spoustě technologických procesů umožňuje vyrobit z polotovaru výrobek požadovaných tvarů, přesnosti a jakosti obrobených ploch. Těchto požadavků dosahujeme odebráním částic pomocí mechanických, elektrických, chemických a jiných účinků, popřípadě jejich kombinacemi.

Mechanickým účinkem je řezání, při kterém dochází k odebrání materiálu ve formě třísek, pomocí břitu řezného nástroje. Řezný proces je realizován v soustavě obrábění (SNOP). Tato soustava je akceptována i s absencí přípravku. Soustavou S-N-O-P se rozumí:⁴

- Stroj (S)
- Nástroj (N)
- Obrobek (O)
- Přípravek (P)

SOUSTRUŽENÍ

Soustružení je metoda obrábění, pomocí které se vyrábí převážně součásti rotačních tvarů, pomocí jednobřitých nástrojů různých provedení. Jedná se o nejjednodušší, ale zato nejpoužívanější způsob obrábění v současnosti. Tvoří až 40 % všech obráběcích operací. Při soustružení koná hlavní řezný pohyb obrobek, který rotuje kolem své osy, a vedlejší pohyb (posuvový) vykonává soustružnický nůž. Sloučením těchto pohybů dochází k oddělování přebytečné vrstvy (přídavku na obrábění) ve formě třísky řeznou částí nástroje s definovanou geometrií. Aby došlo k oddělování třísky od obráběného materiálu, musí být řezná část nástroje opatřena břitem s vyšší tvrdostí než samotný obráběný materiál. Při soustružení musí být striktně dodržováno několik podmínek pro obrábění (hloubka řezu, rychlost posuvu a řezná rychlost, správná geometrie řezné části řezného nástroje, ...) ⁴

1.1 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL

Ocel ČSN 17 349 je chrom niklová austenitická nestabilizovaná molybdenová nízkouhlíkatá nerezová ocel, používaná pro svařované konstrukce v agresivních prostředích v průmyslu, nebo v přímořském prostředí. Je možné ji použít i v potravinářství pro styk s pokrmu. Jelikož je austenitická, tak má ze všech základních tříd nejvyšší korozivzdornost, kterou lze zvyšovat přidáním molybdenu či mědi. Významnou vlastností je tažnost a houževnatost.

Chemické složení v %

Uhlík - C	Chrom - Cr	Nikl - Ni	Mangan - Mn	Molybden - Mo
<0,03	16,5 – 18,5	10 - 13	<2,0	2,0 - 2,5

Mechanické vlastnosti

Pevnost Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost [%]
530-680	240-270	40

1.2 ŘEZNÉ NÁSTROJE

Řezný nástroj je činným prvkem při procesu obrábění. Při vzájemném působení společně s obrobkem vyvolávají proces řezání. Pracovní částí nástroje (břitem) vniká do obráběného materiálu a odděluje od něj třísky. Řezný nástroj se skládá z několika částí.

Řezná část zahrnuje aktivní prvky tvořící třísku, jako jsou ostří, čelo a hřbet nástroje. Břit je klínovitá část nástroje vnikající do obrobku, ohraničená čelem a hřbetem nástroje.

Upínací částí nástroje je stopka sloužící k upnutí nástroje do obráběcího stroje.

Řezné nástroje jsou v současnosti vyráběny z různých materiálů. Jsou jimi: ⁴

- Rychlořezné oceli (RO)
- **Slinuté karbidy (SK)**
- Cermety
- Řezná keramika (ŘK)
- Supertvrdé materiály
 - Polykrystalický diamant (PKD)
 - Polykrystalický nitrid boru (PKNB)

Pro soustružení jsou nejpoužívanějšími nástroji soustružnické nože. Jsou to nástroje, které mají jeden břit a jednoduché tvary, nemají vysokou cenu, ani vysoké požadavky na údržbu.⁴

Z technologického hlediska se dají dělit na:

- **radiální (nejpoužívanější skupina)**
- prizmatické
- kotoučové
- tangenciální

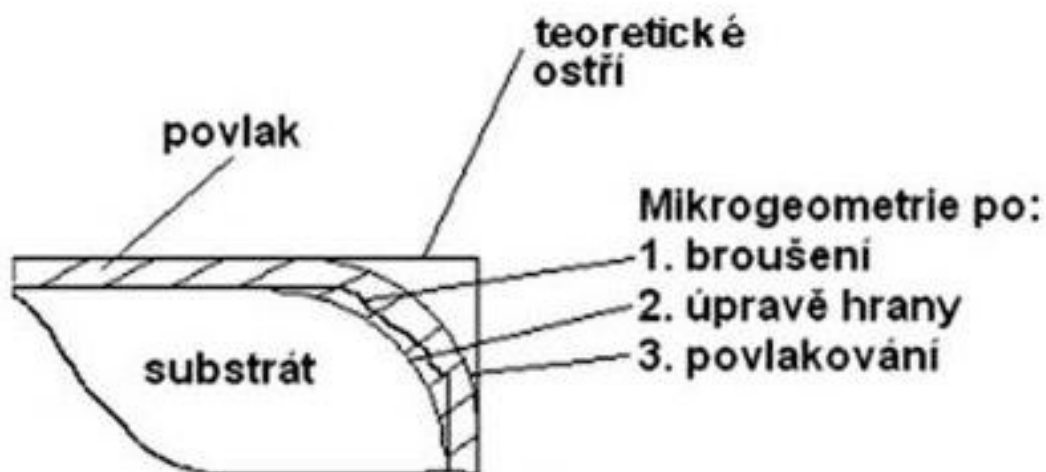
Radiální soustružnické nože se dále dělí na:

- celistvé - těleso i řeznou část tvoří jeden celek
- s pájenými břitovými destičkami - destička z řezného materiálu je připájena tvrdou pájkou do lůžka nože z konstrukční oceli
- **s vyměnitelnými břitovými destičkami** - břitová destička je upnuta v nožovém držáku pomocí mechanického systému upínání ISO ⁴

Řeznou částí nástroje v našem případě rozumíme vyměnitelnou břitovou destičku. Destička se stará o oddělování třísky od materiálu, tudíž je nejnamáhanější součástí nástroje. Stále vyšší nároky u nástrojů jsou kladeny na řezivost, která je ovlivňována mnoha faktory. Vlastnosti břitových destiček jsou ovlivněny hlavně:¹

- materiálem
- geometrií
- povlakem

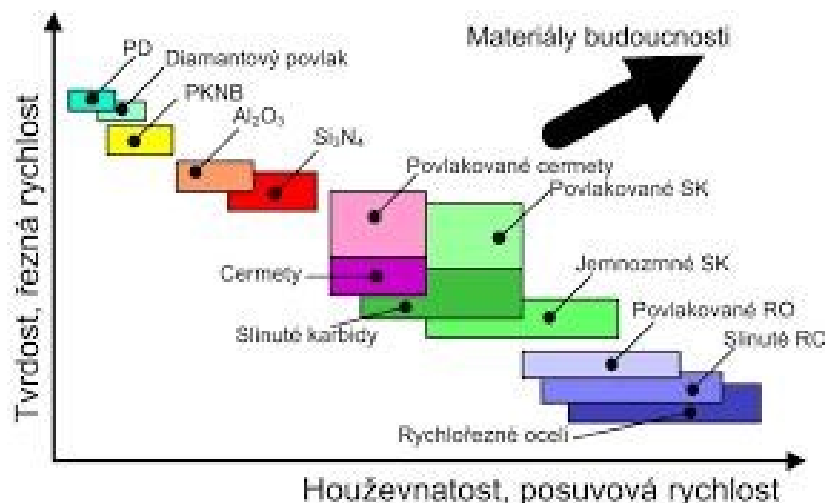
Geometrie řezné části nástroje, ovlivňuje řezné síly a je nejdůležitějším činitelem ovlivňujícími trvanlivost nástroje, bezpečnost práce a v neposlední řadě jakost obrobeného povrchu. Geometrie nástroje se dá rozdělit na makrogeometrii a mikrogeometrii. Zatímco makrogeometrie představuje tvary či úhly destičky, mikrogeometrií rozumíme spíše útvary v řádech mikrometrů, které jsou součástí břitu (utvařeč, fazetka, zaoblení). Všechny funkční vlastnosti spolu úzce souvisí. Mikrogeometrie je ovlivněna nejen řezným materiálem v tom ohledu, jak dobře se dá vybrousit do „dokonalé ostrosti“, ale i použitým povlakem, který dokonale kopíruje povrch nástroje a mění kvalitu drsnosti povrchu.²



Obrázek 1.1 – Schéma mikroteometrie nástroje po jednotlivých úpravách ¹

Na obrázku 1.1 je zakresleno schéma mikroteometrie nástroje. Z mikroteometrie je zřejmé, že po procesu broušení je potřeba upravit řeznou hranu. Teprve poté je možné nanášení povlaku. Podmínkou při broušení je zohlednění tloušťky nanášené vrstvy povlaku, aby i po nanesení povlaku byl zachován potřebný poloměr zaoblení ostří. Úpravy hran a povrchu se provádí mnoha způsoby, většinou za působení různých brousících částic, společně s vhodným médiem. ¹

V oblasti obrábění se již dlouho a intenzivně zkoumají a vyvíjejí nové konstrukční materiály a nové obráběcí stroje a centra. S tímto vývojem úzce souvisí i vývoj širokého sortimentu řezných nástrojů. V současné době nelze předpokládat nalezení zcela nového materiálu, všechno úsilí je proto soustředěno na zdokonalování technologií a přesné určení aplikačních oblastí již známých materiálů. Obrázek 1.2 znázorňuje vlastnosti řezných materiálů při pracovních podmínkách a požadovaný vývoj materiálů budoucnosti. Aplikační oblasti jsou omezeny mechanickými, fyzikálními, chemickými a tepelnými vlastnostmi nástrojového materiálu. Velmi tvrdé materiály jsou používány při vyšších řezných rychlostech, ale malých průřezech třísky (dokončovací operace). Nejvyšší zatížení je zde teplotní. Naopak vysoce houževnaté materiály se používají při vyšších rychlostech posuvu a vyšších průřezech třísky (hrubovací operace), kde převládá zatížení mechanické. ³



Obrázek 1.2 – Vliv mechanických vlastností na pracovní podmínky ³

1.2.1 MATERIÁL - SLINUTÉ KARBIDY

Základem současných slinutých karbidů jsou sloučeniny uhlíku (karbidů) společně s těžkovitými kovy. Základ všech druhů slinutých karbidů pro obrábění tvoří karbid wolframu (WC). Pojícím prvkem pro většinu slinutých karbidů je kobalt (Co). Podle množství jednotlivých složek se dosahuje požadovaných vlastností břitových destiček. Další doplňkové karbidy pro výrobu SK jsou:

- karbidy titanu (TiC)
- karbidy tantalu (TaC)
- karbidy niobu (NbC)
- karbidy chromu (Cr_3C_2)

SK disponují vyšším modulem pružnosti, ohybovou pevností a lomovou houževnatostí, proto se využívají při vysokých posuvových rychlostech a těžkých přerušovaných řezech. Neodolávají vysokým teplotním podmínkám, tudíž je jejich použití omezeno jen na nižší řezné rychlosti. Jinak tomu je u povlakovaných slinutých karbidů. Jsou složeny z relativně houževnatého a pevného podkladu. Jeho tvrdost a termochemickou odolnost zabezpečuje použitý povlak.³

Dle ČSN ISO 513 jsou slinuté karbidy rozdělovány podle řezných aplikací a využití do šesti skupin, podle materiálu, který je obráběn. Dále jsou děleny do jednotlivých podskupin. Čím větší je číslo podskupiny, tím vyšší je obsah pojiva, dále se zvyšujícím číslem roste houževnatost a pevnost, naopak tvrdost a oteruvzdornost klesá. U řezných podmínek se se zvyšující hodnotou podskupiny zvyšuje rychlost posuvu a průřez třísky, ale klesá řezná rychlost.³

P – modrá barva značení (P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50)

M - žlutá barva značení (M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40)

K – červená barva značení (K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40)

N – zelená barva značení (N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30)

S – hnědá barva značení (S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30)

H – tmavošedá barva značení (H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30)¹³

Skupina P

Pro obrábění materiálu tvořící dlouhou třísku (uhlíkové, feritické korozivzdorné a slitinové oceli). Proces řezání je zpravidla doprovázen velkými řeznými silami, tudíž i velkým opotřebením na čele nástroje. Velký obsah karbidů titanu a tantalu zlepšuje odolnost proti vymílání čela. Karbid titanu zajišťuje odolnost proti difuzí za vysokých teplot.¹³

Skupina M

Má univerzální použití, pro obrábění materiálů tvořící dlouhou a střední délku třísky. (tvárné slitiny, austenitické korozivzdorné a lité oceli). Tato skupina slinutých karbidů má vysokou houževnatost, tudíž je využitelná při těžkých hrubovacích a přerušovaných řezech. Dochází k vydrolování ostří vlivem středních až vysokých hodnot řezných sil.¹³

Skupina K

Užití při obrábění materiálu tvořící krátkou drobivou třísku (šedé litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály). Tato skupina je charakteristická působením spíše nízkých řezných sil, převládá zde spíše mechanické obrušování nástroje nebo naleptávání obráběného materiálu na nástroj.¹³

Skupina N

Určena pro obrábění neželezných materiálů (slitiny hliníku a mědi, reaktoplasty, tvrdá guma)¹³

Skupina S

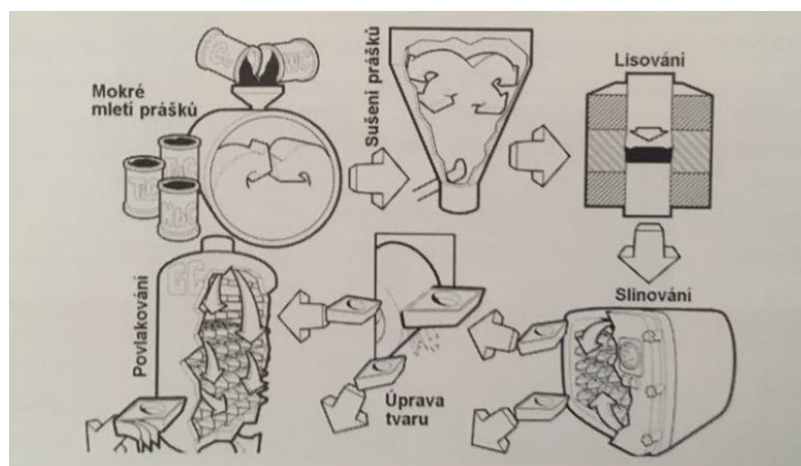
Vhodná pro obrábění tepelně odolných slitin na bázi železa, superslitin na bázi niklu a kobaltu, titanu a titanových slitin.¹³

Skupina H

Skupina slinutých karbidů pro obrábění zušlechtěných ocelí s pevností nad 1500 MPa, kalených ocelí o tvrdosti HRC 48 - 60 (Rockwell) a také tvrzených kokilových litin o tvrdosti HSh 55 – 58 (Shore)¹³

1.2.2 VÝROBA VBD ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ

Výroba destiček ze slinutých karbidů reprezentuje obor práškové metalurgie. Ten se zabývá přípravou prášků požadovaných karbidů a pojiv a jejich mísením v odpovídajících poměrech, lisováním a slinováním. Začíná mletím prášku za sucha či v kapalném prostředí na požadovanou velikost zrna. Prášek se poté musí vysušit. Dále se pokračuje v již zmiňovaném lisování prášku na požadovaný tvar a následném slinování při vysokých teplotách, které má za úkol spojení všech zrn výlisků. Dokončení procesu se týká úprav tvaru břitových destiček broušením či lapováním na požadované tvary. V případě povlakovaných VBD je posledním procesem ve výrobě povlakování, které mnohanásobně zlepšuje mechanické, fyzikální a termochemické vlastnosti. ⁴

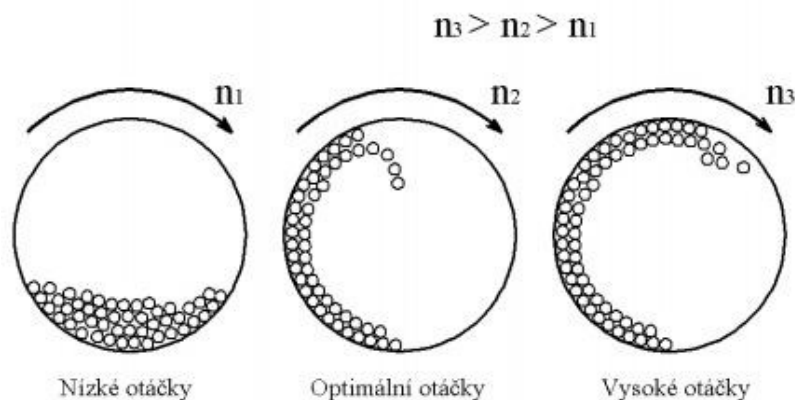


Obrázek 1.3 – Postup při výrobě slinutých karbidů práškovou metalurgií ⁴

1.2.3 VÝROBA PRÁŠKU

Jednou z nejdůležitějších technologických operací při výrobě slinutých karbidů je výroba prášku wolframu. Hlavními horninami které se používají pro výrobu prášku z wolframu jsou wolframit $(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$ a scheelit CaWO_4 . Práškový wolfram se nejdříve získává jako vysoce čistý oxid wolframu, formou redukce oxidu wolframového vodíkem pak vznikne čistý wolframový prášek. Velikost zrn prášku lze redukovat změnou podmínek redukce, která se děje v průběžných elektricky ohřívaných horizontálních trubkových pecích. Vlastnosti slinutých těles, ve kterých je základní složkou karbid wolframu jsou ovlivněny velikostí zrn namletého prášku a poměru, ve kterém se mísí s práškem kobaltu, případně jinými přísady. Po mísení se oba prášky melou ve válcových mlýnech (Obrázek 1.4), aby došlo k dokonalému rozmíchání a homogenizaci. Mlýn se otáčí horizontálně kolem své osy a je naplněn mlecími kuličkami. Pro větší mlecí účinek může být mlýn uložen pružně,

pro zajištění vibrací. Mlecí kuličky působí na směs prášků rázovým a třecím účinkem. Mlecí kuličky a obložení stěn by měly být stejného složení jako pracovní směs, aby nedošlo k jejímu znečištění. Mletí prášku je dlouhodobý proces, který může trvat podle požadované hrubosti zrn až několik dní (48-120 hodin). Různé hrubosti zrna mají odlišné mechanické i fyzikální vlastnosti. Po procesu mletí následuje prosívání směsi prášků. V poslední době je na snaze zmenšovat velikosti karbidických zrn wolframu, pro zlepšení tvrdosti ale zároveň zachování houževnatosti množstvím použitého pojiva.⁴



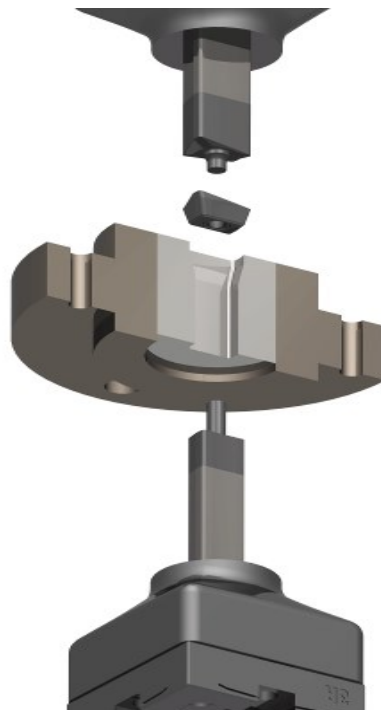
Obrázek 1.4 – Pohyb mlecích kuliček v mlýnu

1.2.4 LISOVÁNÍ SMĚSI

Namleté směsi karbidů a pojícího kovu se dále formují ve formovacích lisech izostatickým lisováním za studena a dalšími způsoby. Jedná se o tvarování chemicky různorodých směsí s nízkou plasticitou. Proto se přidává plastifikátor, který zmenšuje velikost tření mezi lisovacími nástroji a lisovanou směsí a zaručuje zachování tvaru po vyjmutí z lisovací formy. Používají se relativně nízké lisovací tlaky, přičemž musí být výlisek rovnoměrně stlačen v celém svém objemu. Z toho důvodu se většinou používá princip oboustranného lisování. Lisy pro výrobu vyměnitelných břitových destiček musí zaručovat konstantní tlak ve všech směrech pro rovnoměrné stlačení směsi.³

Tabulka 1.1 Smrštění karbidů po slinování ⁴							
Složení [hm. %]			Zrnitost	Smrštění [%] pro lisovací tlak [MPa]			
WC	(W, Ti, Ta) C	Co		50	100	150	200
94	---	6	0,8	28,00	26,50	25,50	24,50
94	---	6	1,2	24,50	22,75	22,00	21,00
91	---	9	4,0	23,00	21,00	20,20	19,60
71	20	9	3,0	22,50	21,00	20,40	19,80

Při lisování se dosahuje požadovaného tvaru destičky, ale musí se zohledňovat smrštění při slinování které závisí na různých faktorech tabulka 1.1 (druh slinovaného karbidu, velikost karbidických zrn, tlak lisování a obsahu pojiva). Podle tabulky se tak určuje hodnota lineárního smrštění po slinování.³



Obrázek 1.5 – Schéma lisování směsi prášků⁶

IZOSTATICKÉ LISOVÁNÍ

Je lisování za studena, které probíhá buď v pružné formě z latexu nebo ze silikonového kaučuku, která se uzavře proti vniknutí pracovního média. Dvě různé metody lisování za studena se liší formou vyvíjení tlaku, a to buď suchá metoda „dry-bag“, která je vyvíjena mechanickým tlakem pístu, nebo mokrá metoda „wet-bag“ vyvíjena hydraulickým tlakem kapaliny

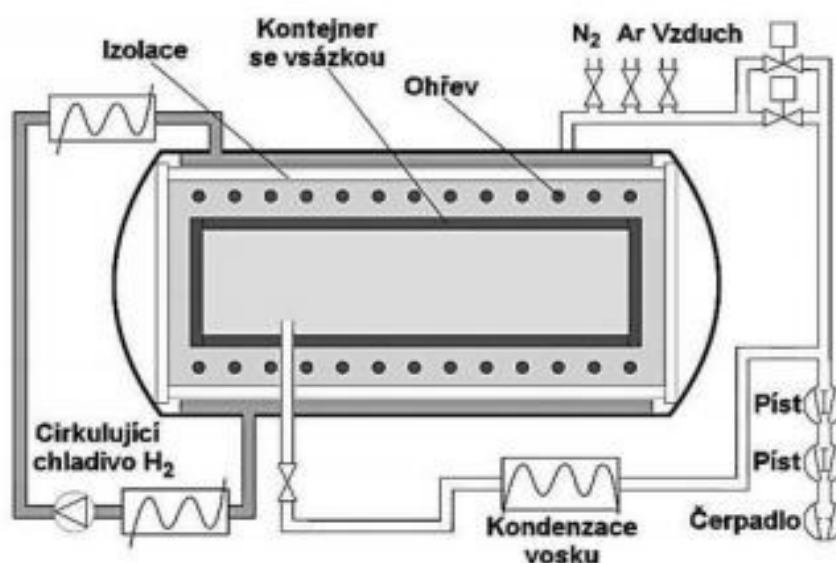
- Suchá metoda „dry-bag“- pro malé výlisky, s možností plné automatizace procesu
- Mokrá metoda „wet bag“ – pro velké výlisky, bez možnosti automatizace procesu³

VYTLAČOVÁNÍ

Vytlačování je moderní proces, pomocí kterého se vyrábí monolitní vrtáky, frézy a jiné rezné nástroje. Dále se dají vyrábět polotovary s vícenásobnými kanálky pro přívod procesní kapaliny. Zařízením pro vytlačování je šnekový podavač, který je naplněn práškem s plastifikátorem a je postupně dodáván do vertikálních komor vytlačovacích lisů. Vytlačování tlakem probíhá plynule, bez přerušení během doplňování prášku.³

1.2.5 SLINOVÁNÍ DESTIČEK

Slinováním se rozumí zhutňování předlisovaného materiálu, při kterém se vytvoří hranice mezi zrny tvrdé fáze a difuzní procesy přeskupí jednotlivé složky. Vylisované těleso se umístí do pece, (která je schematicky zakreslena na Obrázku 1.5) a je za řízených podmínek nejprve ohříváno a následně ochlazováno buď v atmosféře, smíšené atmosféře nebo ve vakuu. Po dokončení procesu slinování má destička požadované rozměry, mikrostrukturu a očekávané mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Slinování se dá dělit na dvě části, a to předslinování pro odstranění plastifikátoru (bez změny tvaru za teplot 700 - 850 °C) a samotné slinování (v závislosti na složení materiálu se pohybuje v rozmezí teplot 1350 – 1620 °C), ale tyto dvě části se mohou spojit do jedné operace.³



Obrázek 1.6 – Slinovací pec – schematicky⁴

GRADIENTNÍ SLINOVÁNÍ

Pojem funkčně gradientních materiálů (FGM) je aplikací moderní myšlenky přizpůsobení mikrostruktury pro různé materiály, nejen pro ty vystavené abrazivnímu a tepelně-mechanickému zatížení. Má tedy obrovský potenciál pro využití i u elektronických materiálů a bio materiálů. Slinuté karbidy jsou většinou po slinování pro zvýšení trvanlivosti a řezného výkonu povlakovány tenkou vrstvou různých forem povlaků. V povlacích se často vytvářejí mikrotrhliny, které se mohou rozšířit až do substrátu a mají nepříznivý vliv na opotřebení bříty. Řešením je tato metoda, která umožňuje vytvořit tvrdé jádro a houževnatý povrch při použití substrátu s gradientní strukturou, ale pouze v určitém objemu substrátu. Struktura takového materiálu je pak tvořena větším obsahem pojiva, a tudíž menším podílem zrn kubických karbidů. Základním předpokladem pro tvorbu vrstvy bez kubické fáze je přítomnost titanu a dusíku již při začátku slinování.³

1.2.6 ÚPRAVA NÁSTROJŮ PŘED POVLAKOVÁNÍM

BROUŠENNÍ

Přilnavost mezi nástrojem a povlakem je ovlivňována kvalitou broušených ploch a břitů nástroje. V místech výskytu ostrých nerovností může dojít k odloupávání povlaku z nástroje. Tento negativní dopad se dá ovlivnit správnou mechanickou úpravou (broušení, leštění, kartáčování) funkčních částí nástroje. Důležitým předpokladem je zvolení správného abraziva.³

ODMAŠŤOVÁNÍ

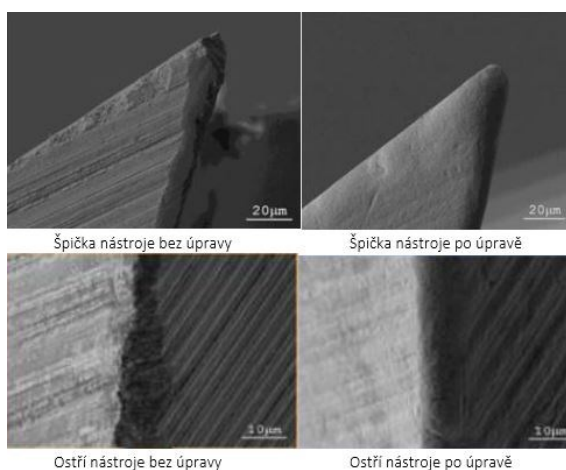
Odstraňuje buď konverzační, nebo jiné mastné nečistoty z povrchu nástroje. Používají se zde různá ropná odmašťovadla, obsahující tenzidy a uhlovodíky, které se starají o dobrou přilnavost k nástroji.³

MOKRÉ ČIŠTĚNÍ

Při mokrému čištění je pracovním médiem kapalná čistící látka, která je dopravována do mycí lázně pomocí čerpadla. Samotné čištění se uskutečňuje v alkalickém prostředí, nejčastěji jsou to zásadité roztoky obsahující hydroxid draselný nebo hydroxid sodný v kombinaci s kyselinou citrónovou či fosforečnou.³

OMÍLÁNÍ, KARTÁČOVÁNÍ, TRYSKÁNÍ (PÍSKOVÁNÍ)

To jsou metody, používané pro sériovou přípravu substrátů, kterými lze odstranit nečistoty, které jsou pevně soudržné s povrchem nástroje i nečistoty které jsou uchycené v pórovitém povrchu. Médii pro tyto operace jsou brousící částice (abraziva) se zrnitostí v řádech desítek mikrometrů. Při těchto operacích se však musí dbát na zvýšenou opatrnost, aby nedošlo k negativnímu ovlivnění břitových destiček, jako jsou třeba nevhodné zaoblení hran, či zmatnění upínacích nebo dekorativních ploch.³



Obrázek 1.7 - Mikroskopický pohled na vzhled ostří před a po omílání⁹

1.3 POVLAKOVÁNÍ

Před samotným povlakováním musí být nástroj dokonale očištěn od mastnoty a nečistot. Povlakování je poslední proces a důležitá operace při výrobě slinutých karbidů, ke zvýšení trvanlivosti nástroje. U nástrojů je požadována co nejvyšší houževnatost společně s otěruvzdorností. Ideálním řešením řezného nástroje je houževnaté jádro a tvrdý, otěruvzdorný povrch. Těmto požadavkům vyhovují řezné nástroje ze slinutých karbidů, povlakované ať už jednou, nebo více vrstvami karbidů. V současnosti se používá hlavně karbid titanu (TiC), nitrid titanu (TiN), nebo jejich kombinace (TiCN), oxid hlinitý (Al_2O_3) a kombinace oxidu hlinitého společně s nitridem titanu (TiAlN), ale i mnoho dalších prvků. Karbid titanu se vyznačuje nejvyšší tvrdostí, tudíž má nejvyšší odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Nitrid titanu není tak otěruvzdorný, ale zato má vysokou termodynamickou stabilitu. Oxid hlinitý má vysokou tvrdost, tudíž otěruvzdornost hlavně při vysokých teplotách. Kvůli těmto vlastnostem jednotlivých povlaků má velký význam vícevrstvá technologie, při které je dosaženo optimální kombinace vlastností povlakovaných destiček. Povlak ve srovnání se substrátem neobsahuje žádné pojivo, má nižší zrnitost a méně strukturních vad a vytváří zábranu proti opotřebení vlivem difuze. Těmito aspekty je zaručeno zlepšení vlastností nástroje a umožněno zvýšení řezných rychlostí a posuvů oproti nepovlakovaným slinutým karbidům. Většinou se uvádějí vývojové stupně:³

- 1. generace – Jednovrstvý povlak s tloušťkou kolem 6 μm , ale vlivem nedokonalosti technologie docházelo k odlupování povlaku a znehodnocování nástroje.
- 2. generace – Jednovrstvý povlak, ale zdokonalení technologie vedlo k možnosti vytvoření větší tloušťky povlaku (7-10 μm), bez nebezpečí jeho odlupování.
- 3. generace – Vícevrstvý povlak (dvě až tři, někdy i více vrstev). Jako první jsou nanášeny lépe přilnavé povlaky k podkladu, na ně tvrdší otěruvzdorné.
- 4. generace – „Multivrstvý“ povlak (10 a více vrstev a mezivrstev). Stejně materiály povlaků jako u třetí generace, nanášeny cíleným řízením atmosféry u CVD, nebo odpařováním u metody PVD³

Pro dnešní vyměnitelné břitové destičky jsou nejčastěji používány povlaky třetí a čtvrté generace, hlavně díky výraznému vývoji povlaků v 80. letech 20. století.⁷

Metody povlakování:

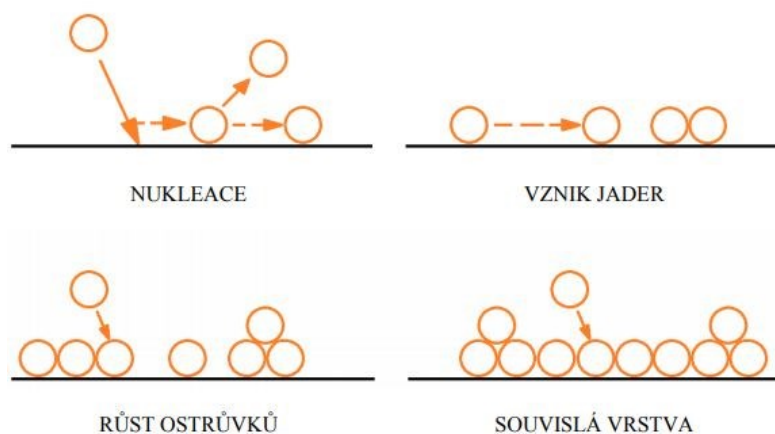
- Metoda PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování)
- Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze)

1.3.1 METODA PVD

Zakládá se na usazování částic na nástroji pomocí odpařování nebo odprašení pevné látky pomocí řízené atmosféry, charakteristicky v pracovních teplotách pod 600°C. Tato metoda povlaků vzniká při tlacích okolo 0,1 – 1 Pa ve vakuové komoře, do které je vháněn pracovní plyn (argon, dusík, ...). Nejdříve byla vyvinuta pro povlakování rychlořezných ocelí, ale v současnosti dochází k velkému rozvoji a využívá se i pro povlakování slinutých karbidů. Podle získávání kovových iontů se provádí: ^{3,8}

- Napařováním
- Naprašováním

Usazení jednotlivých vrstev povlaku může probíhat částečnou modifikací povrchu zachycením částic nebo tvorbou mezivrstvy, která zvyšuje přilnavost vrstvy k nástroji. Přilnavost je základním předpokladem pro PVD metodu. ⁸



Obrázek 1.8 Schéma vzniku PVD povlaku na nástroji ³

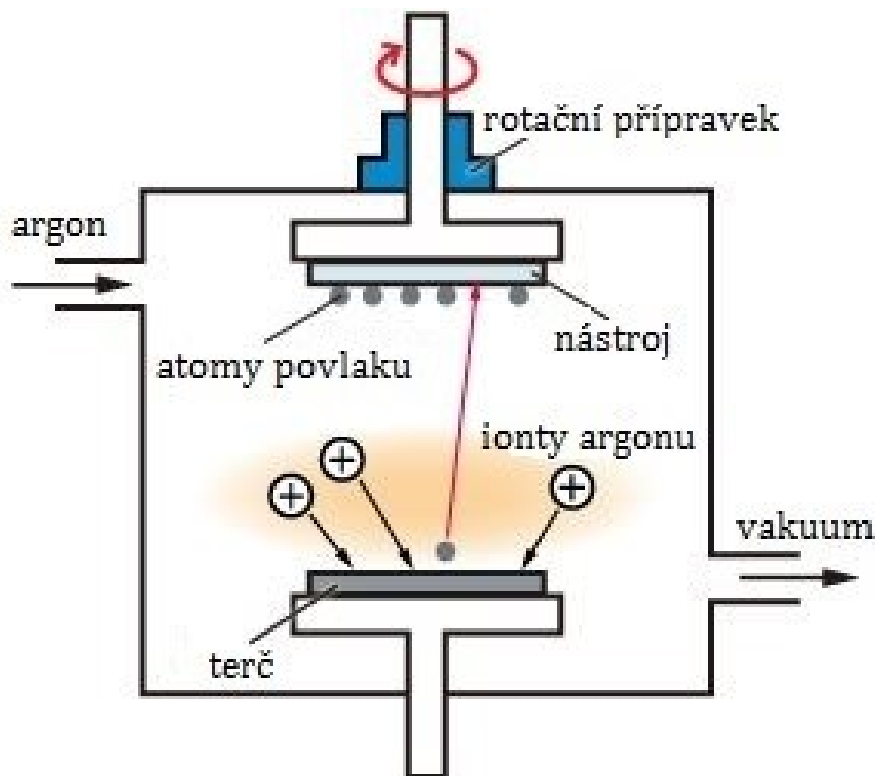
NAPAŘOVÁNÍ

Při napařování je materiál odpařován z nahřívaných terčů různými způsoby. Stejně tak substrát může být ohříván nebo připojen na požadované předpětí pomocí napájení. Atomy požadovaného materiálu tvořící povlak se před uchycením na substrát pohybují po nekolizních drahách, což má za následek nanášení nerovnoměrné vrstvy povlaku. Proto je do pracovní komory přiváděn pracovní plyn, který se sráží s těmito atomy a umožňuje tak nanesení rovnoměrné tloušťky povlaku. ³

NAPRAŠOVÁNÍ

Naprašováním rozumíme nanesení částic oddělených z terčů fyzikálním odprašovacím procesem ve vakuu za tlaku nižšího než 0,7 Pa. Odprašené částice se na povrch substrátu dostanou bez kolize s plynem, při pohybu od katody k anodě. Naprašování

Ize provádět i při vyšším tlaku (0,7 – 2 Pa), což má za následek srážky odprášených částic terče s aktivním plynem. Tím se atomy ohřívají již před usazením na povrch nástroje. Tato metoda umožňuje nanášet tenké povlaky z těžkotavitelných materiálů bez ohřevu terče, který je nutný při procesu odpařování.³



Obrázek 1.9 Jednoduché schéma naprašování¹⁰

1.3.2 METODA CVD

Jde o chemickou metodu povlakování. Je založena na reakci plynných chemických sloučenin v plazmě. Plazma se vytváří v bezprostřední vzdálenosti od nástroje a následuje usazení heterogenních částic na jeho povrchu. Aktivní plyny přitom musí obsahovat prchavou sloučeninu, která se rozkládá vlivem přivedené energie. V plynech musí být obsažen reaktivní plyn pro vytvoření požadované chemické reakce. Charakteristické pro metodu CVD jsou vysoké pracovní teploty (většinou nad 1000 °C). Je hlavní metodou pro povlakování slinutých karbidů, jejíž výhodou je možnost nanesení tlustších vrstev povlaku a skvělá adheze mezi podkladem a jednotlivými vrstvami povlaku. Nevýhodou je ovlivnění podkladového materiálu, zbytková pnutí v povlaku a nemožnost povlakování ostrých hran.

3,7

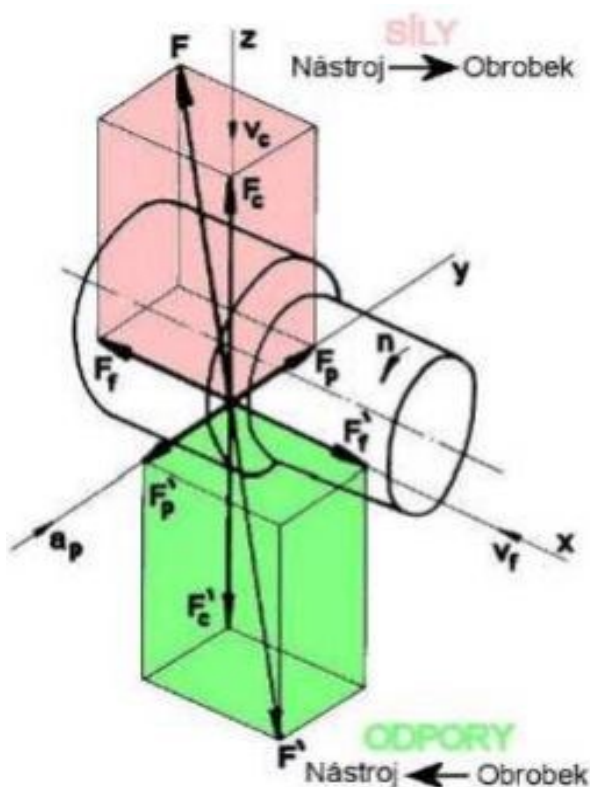
2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VELIKOST ŘEZNÝCH SIL

Nejen posuv a hloubka řezu mají vliv na absolutní velikost a jednotlivé složky síly.

Dalšími faktory jsou:

- Řezná rychlost
- Geometrie nástroje
- Otupení břitu
- Vlastnosti obráběného materiálu
- Řezné prostředí

Tyto faktory ovlivňující celkovou velikost složek síly při soustružení souvisí s vlivem na potřebnou velikost práce pro řezání. Řezná rychlost ovlivňuje všechny tři složky síly téměř shodně. Vliv řezné rychlosti na velikosti řezné složky F_c je obdobný jako vliv na řezný odpor. Geometrie břitu je neméně důležitým faktorem při řešení ovlivnění velikosti řezných sil. Jednotlivé složky soustružení okrajově ovlivňuje úhel čela. Zatímco řezná složka F_c je v souladu s vlivem na řezný odpor, tento odpor má vyšší vliv má na pasivní složku F_p a posuvovou složku F_f . Čím menší je úhel čela, tím větší je posuvová a pasivní složka síly.^{4,17}



Obrázek 2.1 - Rozložení složek síly řezání při soustružení¹⁸

Dalšími ovlivňujícími faktory jsou již zmíněné geometrické parametry nástroje. Úhel sklonu ostří λ_s určuje směr odvodu třísek, a tím ovlivňuje velikost deformační práce vzniklou třením. Úhel nastavení hlavního ostří κ_r ovlivňuje směr vektoru celkové síly F , jeho vliv tedy není na všechny složky síly stejný. Také úhel hřbetu ovlivňuje velikost řezných složek síly. Poloměr špičky bříty r_ϵ má opačný vliv jako úhel nastavení hlavního ostří κ_r . Řezné prostředí je dalším významným činitelem pro snížení řezných i posuvových složek sil řezání. Při výpočtu řezných sil se většinou vychází z geometrie průřezu odřezávané vrstvy. Pro jednotlivé technologie obrábění se mohou lišit.⁴

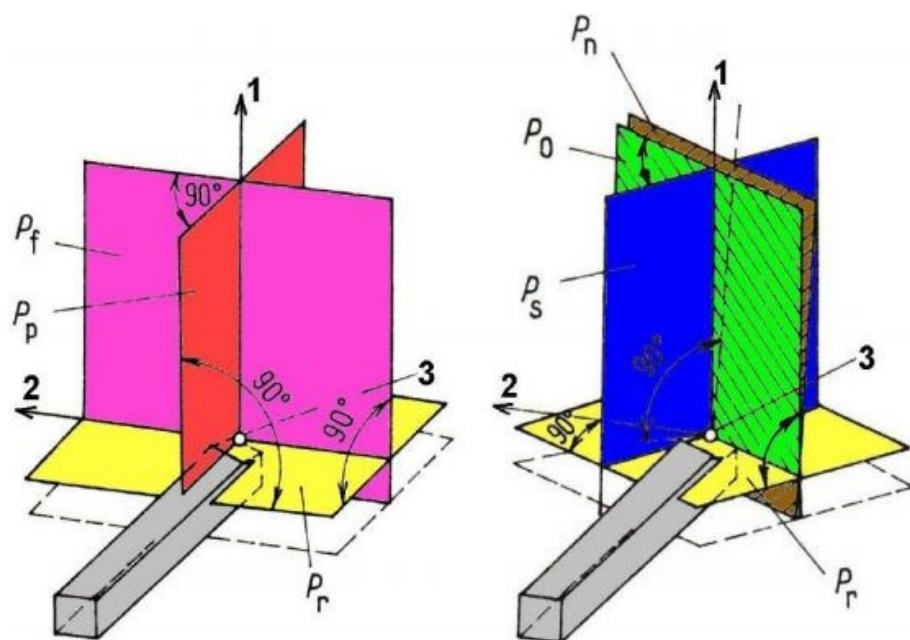
2.1 GEOMETRIE NÁSTROJE

Geometrie bříty nástroje se volí podle materiálu obrobku a podle oblasti použití (např. hrubování), při níž jsou obrobky opracovávány dle technologických požadavků na požadovaný rozměr a jakost obrobeného povrchu.⁴

2.1.1 MAKROGEOMETRIE NÁSTROJE

Termín makrogeometrie nástroje představuje vzájemné geometrické vztahy aktivních ploch nástroje pro výrobu, konstrukci, kontrolu i práci nástroje. Pro definici procesu obrábění je důležité znát jednotlivé úhly nástroje, které se určují ve dvou souřadnicových soustavách:⁴

- Nástrojová souřadnicová soustava - úhly definované v této soustavě se nazývají nástrojové řezné úhly. Úhly se označují různým řeckým písmenem a indexem, určující rovinu, ve které se úhel měří. Základní roviny podle kterých lze definovat jednotlivé nástrojové úhly:⁴
 - nástrojová rovina základní P_r
 - nástrojová rovina boční P_f
 - nástrojová rovina zadní P_p
 - nástrojová rovina ortogonální P_o
 - nástrojová rovina normálová P_n
 - nástrojová rovina ostří P_s ⁴



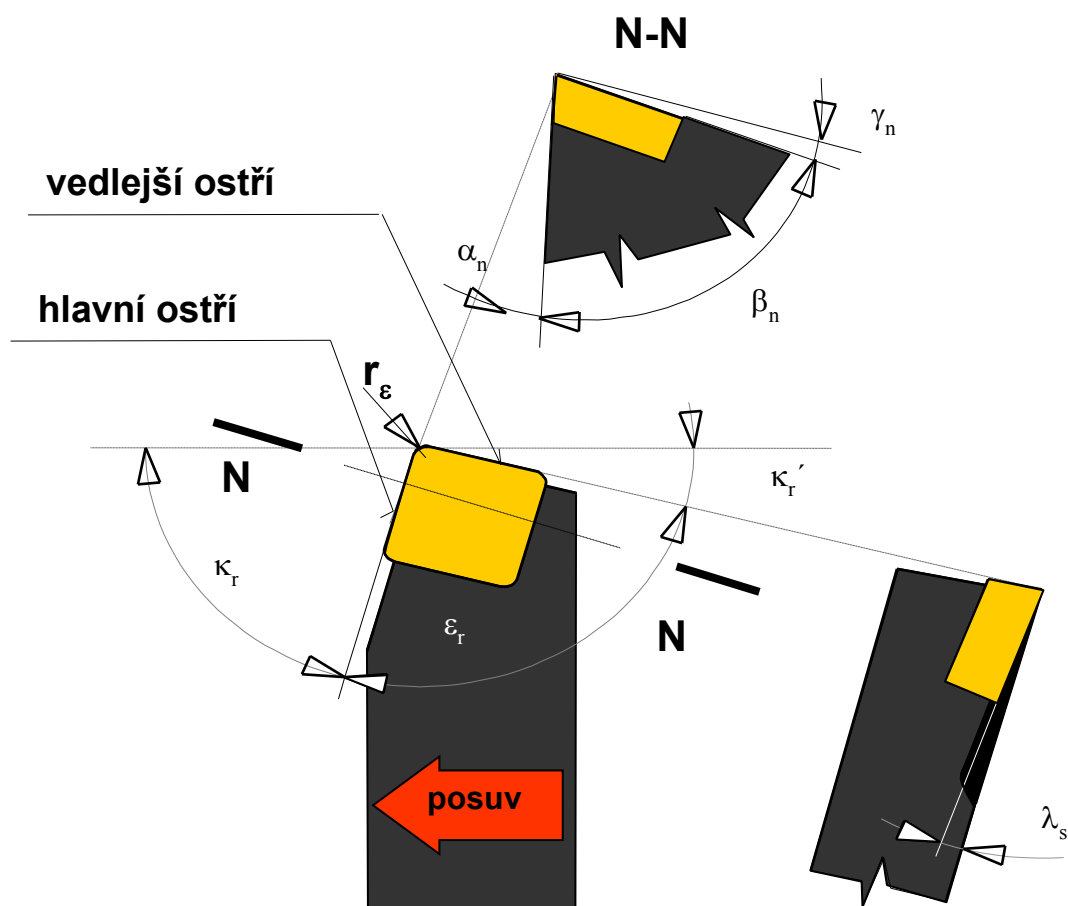
Obrázek 1.8 Roviny nástrojové souřadné soustavy soustružnického nože ⁴

- Pracovní souřadnicová soustava – Určuje geometrii nástroje při obrábění. Nástrojové úhly se při pohybu obrobku a řezného nástroje mění na pracovní. Výjimkou je například proces hoblování, kde jsou nástrojové řezné úhly s pracovními totožné. Pracovní úhly a roviny se definují stejně jako u nástrojové soustavy a pro rozlišení jsou doplněné indexem „e“ ⁴

NÁSTROJOVÉ ÚHLY

Identifikují polohu ostří, čela a hřbetu. Jsou určovány v nástrojové souřadnicové soustavě a nesou stejný index jako nástrojové roviny ve kterých jsou měřeny. Tyto úhly ovlivňují: ⁴

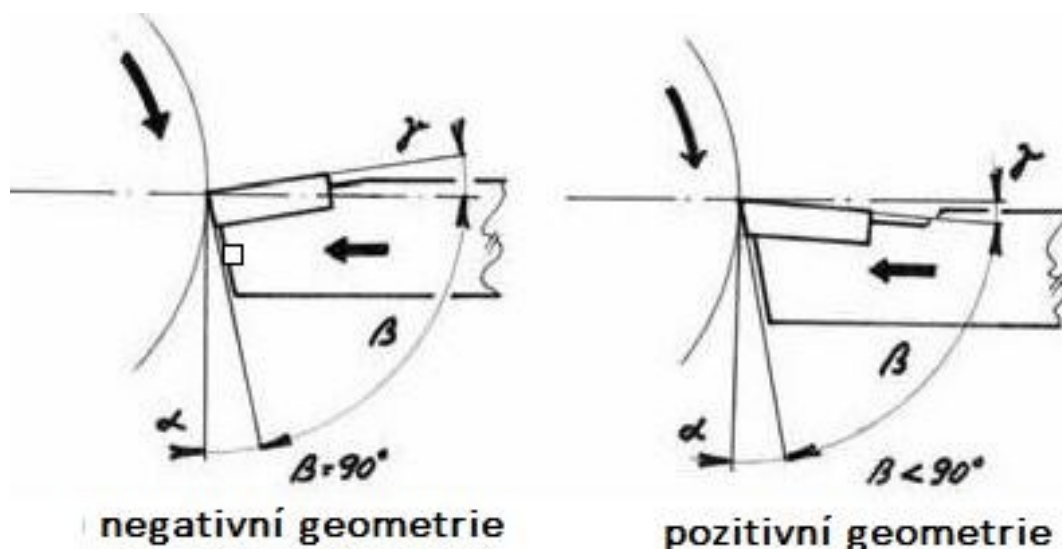
- Řezné síly a její jednotlivé složky
- Teplotu řezání
- Tvorbu třísky a její odvod
- Strukturu povrchu
- Vlastnosti povrchové vrstvy



Obrázek 1.10 – Nástrojové úhly v základních rovinách zakresleny na pravém soustružnickém ubíracím noži

VLIV ÚHLŮ NA ŘEZNÝ PROCES

Při řezání se setkáváme se dvěma základními typy geometrie, a to s pozitivní, nebo negativní. Pozitivní geometrie zaručuje dobrý odvod třísky a nižší řezné síly při kombinaci s rovnou plochou čela. Negativní geometrie má za následek vyšší řezné síly a velké množství vzniklého vlivem horšího odvodu třísek z místa řezu, ale poskytuje velkou pevnost nástroje a soustavy obrábění.¹¹



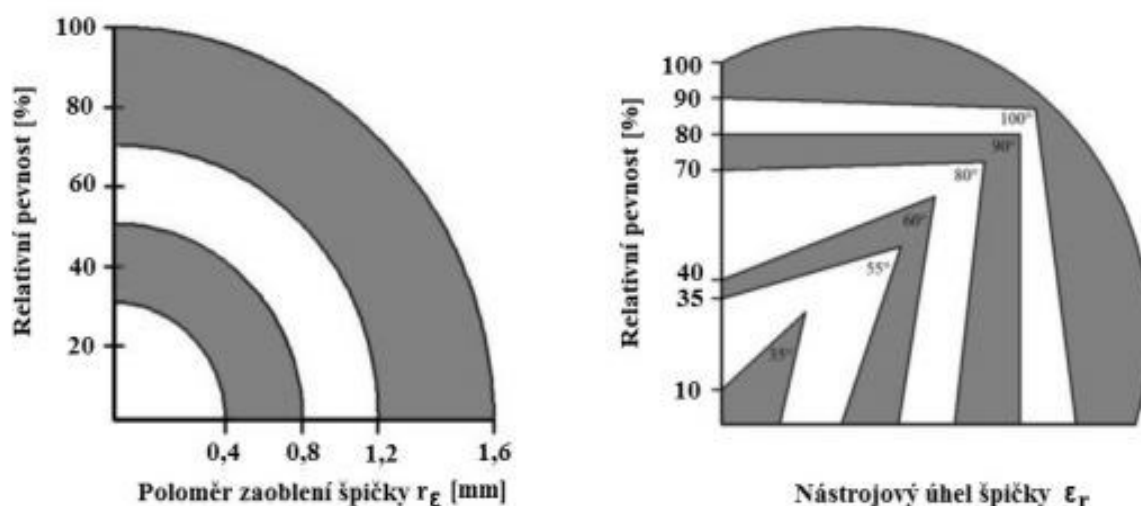
Obrázek 1.11 Schematické porovnání geometrií nástroje ¹³

Tvar řezného klínu nástroje je určován podle poloměru špičky r_ϵ , společně s úhly γ_n , α_n , λ_s , κ_r . Řezný proces je ovlivňován velikostí jednotlivých úhlů, a proto je dobré je měnit podle mechanických vlastností obráběného materiálu, požadované jakosti povrchu a tuhosti použitého stroje. ¹²

Velikost nástrojového ortogonálního úhlu čela γ_n ovlivňuje intenzitu plastické deformace, řeznou sílu, velikost tření třísky na čele nástroje a intenzitu opotřebení nástroje. Nástrojový ortogonální úhel hřbetu α_n určuje polohu hřbetu nástroje, jeho velikost ovlivňuje intenzitu tření mezi nástrojem a přechodovou plochou při obrábění. Čím vyšší jsou hodnoty těchto dvou úhlů, tím nižší je pevnost řezného klínu. Pro obrábění materiálů s vyšší pevností jsou vhodné kombinace malých úhlů společně s malými hodnotami posuvů a vyšší řeznou rychlostí. Směr odchodu třísky ovlivňuje úhel sklonu ostří λ_s a tento úhel se také podílí na pevnosti řezného klínu. Pozitivní úhly jsou aplikovány při obrábění měkkých materiálů a nižších průřezech třísky, negativní úhly při obrábění materiálů vyšší pevností. Nežádoucím vibracím v obráběcí soustavě se dá předejít vykloněním nástroje s velkým poloměrem zaoblení o úhel sklonu ostří λ_s . Nástrojová rovina boční s rovinou hlavního ostří svírající úhel κ_r , určuje délku řezné hrany v záběru, tvar třísky a mění směr jednotlivých složek řezných sil. Rostoucí úhel nastavení hlavního ostří κ_r zaručuje snížení řezného odporu, ale zároveň se zvyšuje opotřebení břitu nástroje. Při klesání úhlu nastavení hlavního ostří κ_r roste pasivní síla F_p , dochází k průhybu obrobku a zvyšují se požadavky na tuhost soustavy pro obrábění. ^{17,19}

Dalším úhlem je úhel břitu β_n , jenž ovlivňuje odpor vyvíjený obráběným materiálem, proti soustružnickému noži. Větší úhel břitu znamená větší pevnost a menší opotřebení, ale menší úhel břitu β_n zajišťuje lepší vnikání do materiálu. Odolnost proti opotřebení se dá zvýšit vytvořením fazetky na čele pod záporným úhlem, která se stará o rozložení složek řezných sil do míst, kde břitová destička prokazuje větší pevnost, aby byla zajištěna stabilita řezného procesu. Negativní geometrie čela v kombinaci s fazetkou způsobuje větší odpor a ovlivňuje utváření třísky, tudíž je od stroje požadován vyšší výkon a je důležité správné přiřazení fazetky k dané oblasti použití.¹⁷

Tvar vyměnitelné břitové destičky je důležitým faktorem v ovlivnění relativní pevnosti destičky. Měl by být v souladu s nastavením hlavního ostří κ_r , nástrojovým poloměrem zaoblení hrotu r_ϵ a úhlem špičky ϵ_r . Právě s úhlem špičky ϵ_r , jenž svírá nástrojová rovina hlavního a vedlejšího ostří, klesá relativní pevnost destičky. Relativní pevnost břitových destiček lze vyčíst z obrázku 1.12, podle kterého je zřejmé že největší pevnost mají destičky kruhového tvaru. Poloměr zaoblení špičky r_ϵ , neboli špička nástroje je nejslabším místem břitu, což je způsobeno lokálním rázovým namáháním a koncentrací celého procesu obrábění do plochy s malým průřezem. Poloměr zaoblení špičky se většinou volí v rozmezí 0,2 - 0,5mm, podle druhu operace (hrubování, obrábění na čisto). Důležitým požadavkem je stabilita nástroje při hrubování. Velký průřez břitu lépe odolává velkým řezným silám při obrábění. Při větším zaoblení břitu v kombinaci se správně zvoleným posuvem je pozitivně ovlivněna jakost obrobené plochy a výška mikronerovností při obrábění na čisto. Větší poloměr zaoblení znamená větší délku řezné hrany v záběru, tudíž je do nástroje lépe rozložené teplo vzniklé řezáním. Naopak se zvýšením délky řezné hrany dochází k působení větší radiální síly na obrobek a tím vzniká možnost vibrací v obráběcí soustavě. Z tohoto důvodu se při velkém poloměru zaoblení špičky doporučuje vyklonění břitové destičky o úhel sklonu ostří λ_s a tím zkrácení délky řezné hrany v záběru. Pro univerzálnost a efektivní řezivost nástrojů jsou pro mnoho operací vhodné destičky s pozitivní řeznou geometrií. Zaručují efektivní odebírání třísky, ale nevýhodou je vznik nerovností a špatné jakosti obrobeného povrchu spojené se snížením trvanlivosti břitu nástroje, při vyšších řezných a posuvových rychlostech.^{5,12,14,17}



Obrázek 1.12 – Relativní pevnost v závislosti na nástrojový úhel a poloměr zaoblení špičky¹⁷

2.2.2 MIKROGEOMETRIE NÁSTROJE

Při výrobě vyměnitelných břitových destiček vznikají při broušení na ostří nástroje různé nepřesnosti a povrchové vady, které negativně ovlivňují kvalitu obrobeného povrchu a trvanlivost nástroje. Velikost těchto defektů je v řádech několika desítek mikrometrů a jsou to hlavně nepravidelnosti povrchu, otřepy, mikrotrhliny a špatná povrchová drsnost. Charakteristickou vlastností břitu po výrobě u vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu je nízká mechanická pevnost, proto dochází při procesu řezání k vytrhávání tvrdých částic karbidů z pojiva. Tím se zvyšuje otupení nástroje a zkracuje se jeho životnost. Navíc mohou tyto defekty vést k nepravidelnému výkonu nástroje a jeho selhání. Z toho důvodu se zavádějí úpravy břitu v řádech mikrometrů, při kterých se ostří nástroje zkosí nebo zaoblí a zároveň se sníží drsnost jeho povrchu. Skutečné ostří břitu není po broušení nikdy dokonale ostré a nachází se na něm stále defekty, avšak znatelně menších rozměrů (okolo 5 μm). Kvalita povrchu břitu hraje důležitou roli při procesu povlakování, protože ovlivňuje přilnavost mezi substrátem a povlakem. Povlak totiž přesně kopíruje tvar a veškeré ostré nerovnosti nebo stopy po broušení a v místech těchto defektů může docházet k porušení nebo dokonce odlupování povlaku.^{16,17}

PRVKY MIKROGEOMETRIE

Nejdůležitější řezná geometrie se vyskytuje až v místě kontaktu nástroje s materiálem, tudíž na břitu nástroje. Geometrie břitu se skládá z tří částí, a to

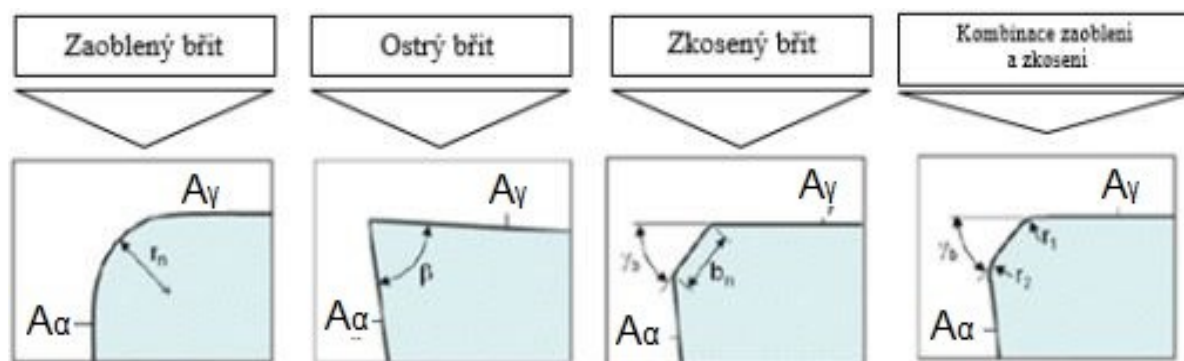
- řezná hrana,
- geometrie fazetky
- geometrie utvařeče třísek

Každá z nich mají svůj vlastní účel, ale pro jednotlivé operace musí být všechny dobře zkombinovány.¹¹

TYPY ŘEZNÉ HRANY

Řezná hrana má tři základní typy geometrie a to ostrou, zaoblenou a zkosenou, nebo kombinaci zaoblené a zkosené. Typ mikrogeometrie se volí podle obráběného materiálu a typu obráběcí operace.¹¹

Ostrá řezná hrana nástroje není stabilní vůči mechanickým zatížením, tudíž hrozí odtrhávání částic břitu s důsledkem snížení trvanlivosti nástroje. Pro většinu obráběcích procesů proto není vhodná. Negativní vliv ostré řezné hrany se omezuje úpravami ostří na již zmíněné zaoblené, zkosené nebo kombinované ostří. Výhodou ostré řezné hrany jsou však nízké řezné síly a nízké riziko vzniku nárůstků na břitu nástroje. Ostrý břit je průsečíkem čelní plochy nástroje A_γ a hřbetu nástroje A_α .^{11,15}



Obrázek 1.13 Typy úprav břitů nástroje¹⁵

Zkosená řezná hrana je rovinná plocha, jejíž zkosení je určeno úhlem zkosení a případně délkou zkosení b_n . Spíše pro použití při hrubování nebo při těžkých přerušovaných řezech. Tato úprava řezné hrany je vhodná pro tvrdé materiály vyrobené z řezné keramiky, nebo supertvrdých materiálu jako je kubický nitrid boru nebo polykrystalický kubický nitrid boru.¹⁵

Zaoblená řezná hrana je charakteristická poloměrem zaoblení špičky r_ϵ a ukazatelem symetrie břitu K , který udává poměr mezi poloměrem zaoblení na čelní ploše nástroje A_γ a

hřbetu nástroje A_α k uvažované špičce nástroje. Využívá se jí pro nástroje ze slinutých karbidů, rychlořezných ocelí a polykrystalického diamantu, nejčastěji pro přesné dokončovací operace.¹⁵

GEOMETRIE T-FAZETKY

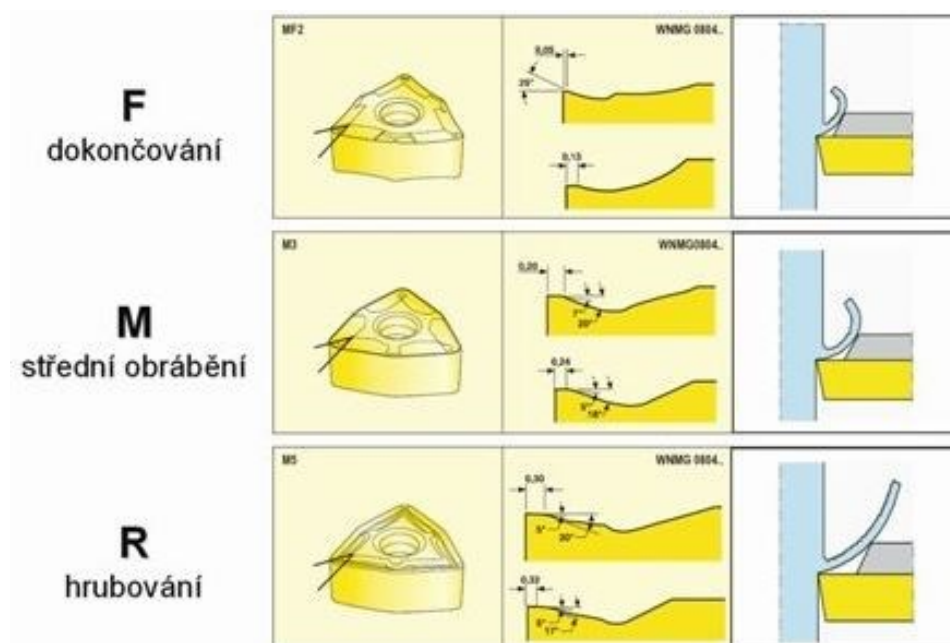
Geometrii T-fazetky jde chápat jako přechodovou oblast mezí břitem a utvařečem třísek. Dělí se na pozitivní a negativní, přičemž pozitivní umožňuje vyšší řezné rychlosti, snižuje řezné síly, vytváří méně tepelné energie a způsobuje menší opotřebení řezné hrany. Na břitu nástroje vzniká koncentrace napětí a možnost poškození a otupení břitu. Geometrií řezné hrany a T-fazetky se velkou mírou ovlivňuje trvanlivost nástroje. Pro správné využití těchto úprav musí být při obrábění velikost posuvu větší než velikost těchto geometrií.¹¹

GEOMETRIE UTVAŘEČE TŘÍSEK

Geometrie utvařeče třísky se stará o proces formování třísky. Rozděluje tři typy geometrie utvařeče podle aplikačních oblastí:

- F- geometrie (dokončovací obráběcí operace)
- M- geometrie (střední obráběcí operace)
- R- geometrie (hrubovací operace)¹¹

U F-geometrie se třísky lámou ve stejném momentě jako jsou utvářeny, tudíž je výsledkem krátká drobná tříška. Negativní dopad má tato geometrie na břit, do kterého jsou soustředěny řezné síly, což má za důsledek vyšší křehkost břitu. M- geometrie utváří středně dlouhé třísky. Řezné síly jsou zde rozloženy i do utvařeče třísky a břit je pevnější. R-Geometrie utváří dlouhou soudržnou třísku, která vytváří velké množství tepla, ale břit je z těchto geometrií nejpevnější. Každá obráběcí operace požaduje svoji specifickou geometrii, proto hledáme pouze správný kompromis mezi schopností utvařeče třísek a pevností břitu.¹¹

Obrázek 1.14 – Typy geometrií utvařečů třísek¹¹

Každá obráběcí operace požaduje svoji specifickou geometrii, proto hledáme pouze správný kompromis mezi schopností utvařeče třísek a pevností břitu.

Typ operace	RR	RR6	RR9	RR96					
R	R4	R5	R56	R57	R6	R66	R7	R8	
MR	MR3	MR4	MR6	MR7					
M	M1	M3	M4	M5					
MF	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5				
FF	FF1	FF2							

Pevnost břitu

Obrázek 1.15 - Tabulka pro výběr správné destičky pro danou operaci¹¹

2.3 ŘEZNÉ PODMÍNKY

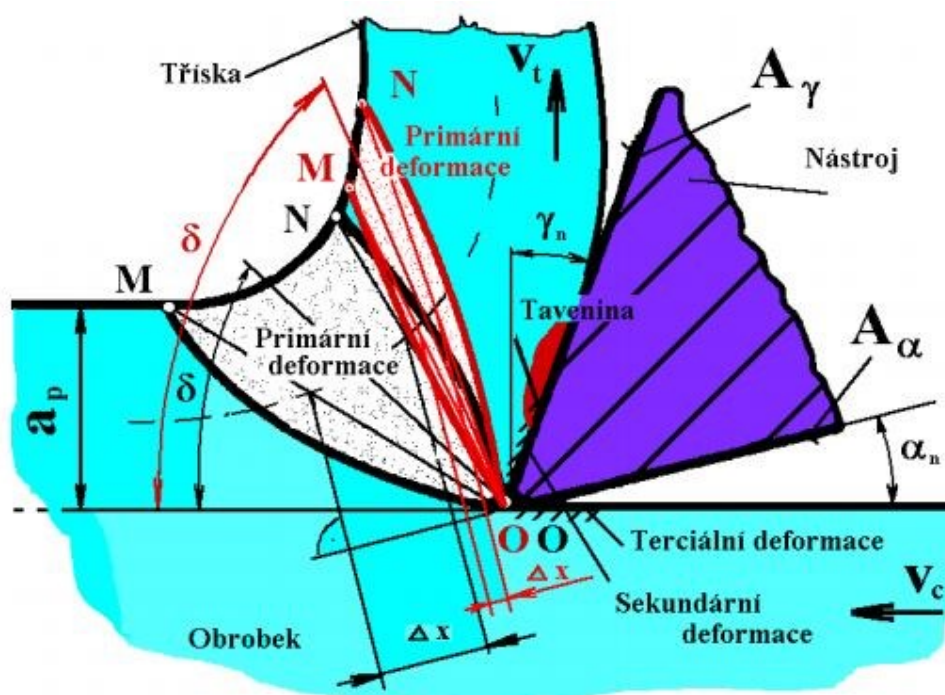
Řezné podmínky se stanovují po splnění všech předpokladů pro obrábění. Většinou jsou pro proces obrábění charakteristické tyto řezné podmínky – posuv f , hloubka řezu a_p a řezná rychlost v_c . Kombinace různých velikostí jednotlivých podmínek určuje množství odebraného materiálu za jednotku času. Volbou řezných podmínek je ovlivněna produktivita práce a samostatné výroby. Často je při výrobě nutné podmínky upravovat nebo kombinovat kvůli mechanickým vlastnostem obráběného materiálu. Pro zajištění efektivního a produktivního obrábění různých materiálů je důležitá správná volba řezného materiálu a příslušných řezných podmínek. Důležitým faktorem ovlivňujícím volbu řezných podmínek je dosažená teplota v místě řezu, při které by mělo podle předpokladů dojít ve struktuře materiálu při procesu řezání k určitým fázovým přeměnám. Pro správnou funkci je proto důležité nastavit nejen správnou hodnotu řezné rychlosti, ale i posuvu a jejich kombinace by měla být správně vyvážená. Vyšší teplota v místě řezu může být zapříčiněna nižší řeznou rychlostí než doporučenou, v případě že je tloušťka odebírané vrstvy omezována rychlostí posuvu. Kontrola správně použitých řezných podmínek se provádí měřením hodnot řezných složek sil. Z měření řezných sil se dá určit potřebný příkon pro obrábění a zajistit energetickou účinnost při řezání. Nedílnou součástí je určení a hodnocení tepelných jevů při řezání, hodnocení trvanlivosti nástroje, posuzování podmínek přesnosti a celkové ekonomické zhodnocení soustružení jakožto třískového obrábění. Jednou z nejvýznamnějších veličin je síla řezání F , která je chápána jako časově proměnná veličina. Napětí v obrobku má za důsledek odpor, kterou musí síla řezání při obrábění neustále překonávat. Velikost řezné rychlosti pro určitý nástroj je nutné měnit v závislosti na tvrdosti obrobku, druhu obráběného materiálu, trvanlivosti nástroje a taky na stavu použitého stroje.^{4,17,19}

2.4 TEORIE TVORBY TŘÍSKY

Obrábění materiálu je velmi složitý dynamický proces, kde vlivem působení řezného klínu nástroje (břitu) dochází k řezání materiálu ve formě třísky. Řezný proces doprovází menší, ale i větší plastické a elastické deformace, které vyvolává klín řezného nástroje. Vlivem této síly vznikají v materiálu elastické deformace, které jsou rozloženy do celého objemu obrobku a jsou závislé na modulu pružnosti obráběného materiálu. Ve chvíli, kdy je překročena mez kluzu obráběného materiálu, dochází ke vzniku plastických deformací. Ty jsou indikovány pouze v primární oblasti řezání. Tato oblast je ohraničena body O, M, N,

na obrázku 2.2 a kromě primární plastické deformace zahrnuje ještě sekundární a terciální plastickou deformaci v kořeni tvorby třísky. ^{4,17,19}

Jelikož je stupeň plasticity materiálu závislý na rychlosti deformace, tak se velikost primární plastické deformace odvíjí od řezné rychlosti v_c . Dále závisí hlavně na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu a jeho deformační a zpevňovací schopnosti, ale taky na řezném prostředí a geometrii řezného nástroje. Obecně se zároveň zvětšuje úhel stříhu a zmenšuje primární plastická oblast s rostoucí řeznou rychlostí. Čím větší je řezná rychlost, tím se zmenšuje oblast primární plastické deformace a body M a N z obrázku 2.2 se téměř dotýkají. ¹⁷



Obrázek 2.2 – Schéma tvorby třísky ⁴

Při vysokých řezných rychlostech plastická deformace nezasahuje pod rovinu řezu a ke vzniku třísky tak dochází pouze v jedné rovině. Vlivem vysokých rychlostí vzniklá zúžená oblast primární plastické deformace, není příčinou zpevnění, ani deformací obráběného materiálu v povrchové vrstvě obráběného materiálu. Tyto faktory se projevují spíše při nízkých řezných rychlostech, kde se odřezávaný povrch výrazně plasticky deformuje a tvoří se zpevněná tříska, která může mít i vyšší tvrdost než původní materiál. Malé rychlosti způsobují větší řezný odpor kvůli zpevnění třísky a malému úhlu stříhu δ a zvětšují kontaktní plochu s čelem nástroje a tloušťku odcházející třísky. Při zvětšování tloušťky odcházející třísky roste i koeficient přechování třísky K . ^{4,17}

Vlivem primárních plastických deformací materiálu vzniká rozdíl mezi průřezem odřezávané vrstvy S a průřezem vzniklé třísky S_1 . Tloušťka odřezávané vrstvy a , je vždy

menší než tloušťka vzniklé třísky a_1 a dráha nástroje l je vždy větší než délka vzniklé třísky l_1 . Z toho důvodu se dá koeficient přechování třísky K stanovit tímto způsobem: ⁴

$$K = \frac{a_1}{a} = \frac{l}{l_1} = \frac{s_1}{s} \quad 2.1$$

Častěji se však používá hmotnostní metoda, kde je známa měrná hmotnost ρ , musí se zvážit hmotnost vzniklé třísky m_1 a změřit délka l_1 . Poté se dá vypočítat součinitel přechování třísky K pomocí matematického výrazu: ⁴

$$K = \frac{1000 \cdot m_1}{l_1 \cdot \rho \cdot s} \quad 2.2$$

Pokud je tloušťka vzniklé třísky a_1 větší než tloušťka odřezávané vrstvy a , tak obvykle dochází k přechování odřezávané vrstvy materiálu a rychlost odchodu třísky v_t po čele nástroje je menší než řezná rychlost v_c . Čím větší je hodnota koeficientu zpevnění K , tím více je tříska namáhána deformacemi a větší jsou i složky síly řezání. Vlivem nízké řezné rychlosti zasahuje oblast primární plastické deformace i pod úroveň plochy řezu a tím dochází ke zpevnění povrchových vrstev obráběného materiálu. Obecně je úhel stříhu δ rostoucí společně se zvyšující se řeznou rychlostí. Primární plastická deformace působí pouze v průřezu odřezávané vrstvy materiálu, a tím je způsoben menší průřez třísky. Proces obrábění je tak energeticky výhodnější, protože dochází k menšímu mechanickému zatížení a ovlivnění nástroje ale i povrchových vrstev obráběného materiálu. ^{4,17}

Oblast sekundární plastické deformace je další oblastí výskytu plastických deformací. Sekundární plastická deformace vzniká v kontaktní zóně v důsledku působení tlaků a téměř stálého tření odcházející třísky po čele nástroje. Vlivem přitlačných a třecích sil zde narůstá teplota a vznikají difuzní a abrazivní poruchy, které způsobují velké opotřebení čela nástroje. Intenzivní tření třísky o čelo nástroje způsobuje na povrchu nástroje kontakt čistých kovových ploch a vznik adhezních sil. Výsledkem intenzivního tření je vznik přilnavých svarů, které jsou dalším vzájemným pohybem odtrhávány. U některých speciálních materiálů se může postupným nárůstem adhezních vrstev na čele nástroje vytvořit nárůstek, který je tvořen napěchovanou vrstvou obráběného materiálu. Ten může po určitou dobu přebrat funkci bříty a chránit ho proti opotřebení. Velikost a intenzitu

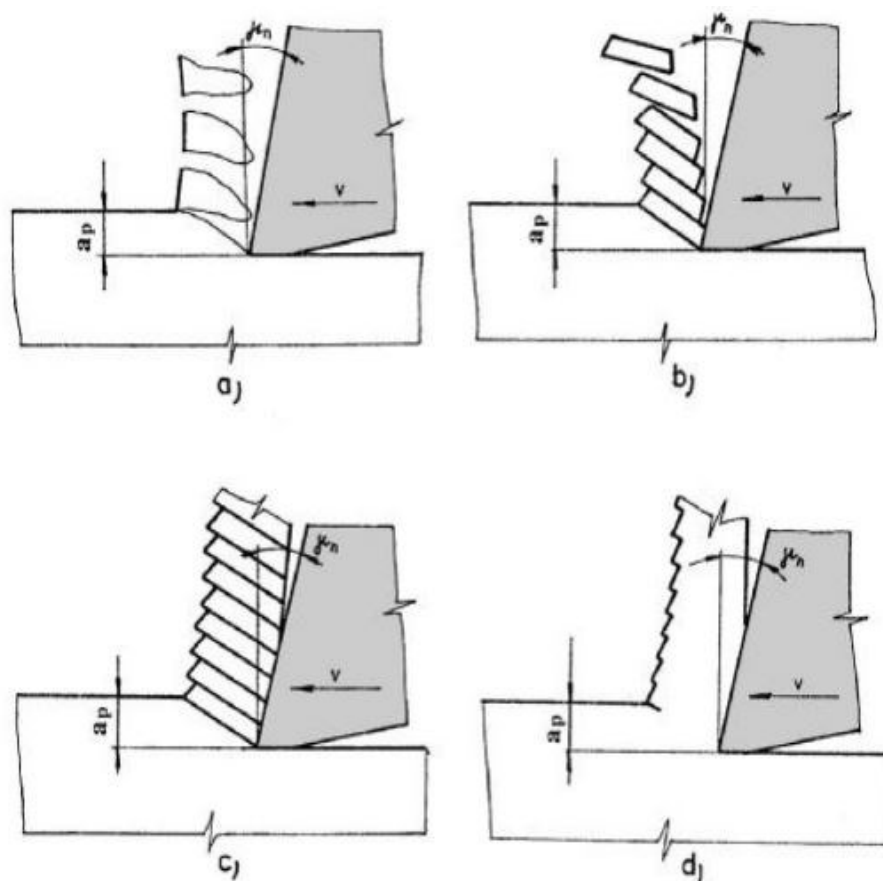
tvorby nárůstků ovlivňují řezné podmínky. Samotný nárůstek pak ovlivňuje rozměry obrobku, jakost povrchu nástroje a způsobuje chvění nebo kmitání obráběcí soustavy.¹⁷

Terciální plastická deformace je způsobena doléháním obráběného materiálu na hřbet nástroje, kde dochází ke tření. Síla tohoto tření ovlivňuje teplotu povrchových vrstev řezného nástroje a snižuje jeho trvanlivost vlivem opotřebení. U obrobku je terciální deformací ovlivněna drsnost povrchu a má za následek vznik zbytkových napětí, způsobený strukturními změnami a vysokou teplotou.¹⁷

2.5 TVORBA TŘÍSKY

U většiny technických materiálů dochází k plastické deformaci vlivem silového působení břitu na obráběný materiál. Při této plastické deformaci vzniká tvářená tříska.

Nejobvyklejším druhem stříhané třísky je tříska plynulá. Vytváří se hlavně u kovů a slitin s krychlovou plošně nebo prostorově středěnou krystalickou mřížkou s dobrou tepelnou vodivostí a nízkou tvrdostí. Článekovitá tříska je typická pro materiály s hexagonální krystalickou mřížkou, které mají nízkou tepelnou vodivost a vysokou tvrdost. Tvar vzniklé třísky ovlivňují nejen vlastnosti obráběného materiálu, ale mnohé další aspekty jako jsou třeba řezné podmínky, řezné síly, teploty a vibrace. S rostoucím úhlem nastavení se zvětšuje tloušťka třísky a šířka se snižuje. Určuje taky délku a směr odchodu třísky. Na tvar a velikost třísek mají z hlediska řezných podmínek větší vliv hodnoty posuvu f a hloubky řezu a_p než řezná rychlost v_c . Avšak řezná rychlost určuje druh vzniklé třísky. Při nízkých rychlostech vzniká tříska soudržná, a to buď plynulá - Obrázek 2.3 d) nebo stupňovitá tvořená spojenými elementy - Obrázek 2.3 c). Při vysokých rychlostech může vznikat tříska elementární, neboli drobivá – Obrázek 2.3 a),b).²⁰

Obrázek 2.3 Druhy třísky²⁰

2.6 MECHANICKÉ ZATÍŽENÍ, ŘEZNÉ SÍLY A JEJÍ SLOŽKY

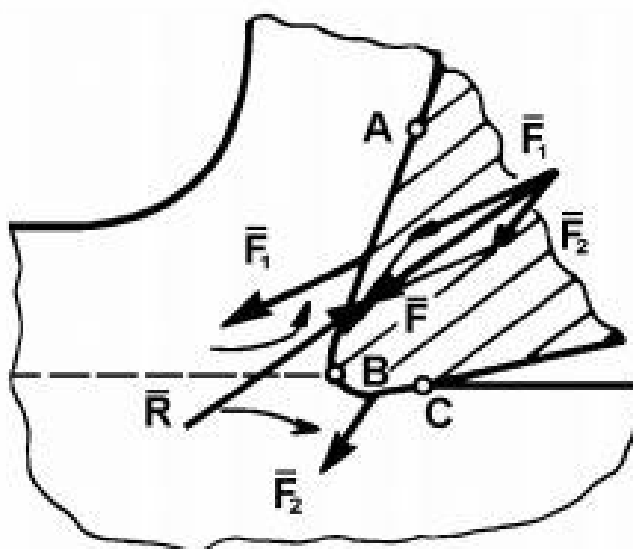
Proces řezání je doprovázen působením silových poměrů a lze je rozložit na sílu vyvolanou odcházející třískou F_n (F_1), působící kolmo na čelo nástroje a na sílu tření F_t (F_2), působící mezi stykovou plochou nástroje a odřezávanou vrstvou materiálu. Tyto složky síly se dají sloučit a vytvoří tak výslednou sílu řezání F . Síla řezání je dynamickým faktorem. Při řezání obráběného materiálu její okamžitá velikost F_{ok} osciluje, a to i za konstantních řezných podmínek. Kolísání této síly je způsobeno disperzí mechanických vlastností obráběného materiálu a systémem tvorby třísky. Typický rozklad řezné síly na složky je pro soustružení na obrázku 2.3. Velikosti jednotlivých složek sil jsou dány především technologií obrábění a geometrií nástroje. Nejvýznamnější složkou všech sil je řezná složka F_c . Ta působí ve stejném směru jako řezný pohyb a je určující pro potřebný výkon obráběcího stroje a taky pro množství vytvořeného tepla v místě řezu. Právě proto se podle této složky omezují a optimalizují řezné parametry obrábění. Radiálně v kolmém směru k obrobku působí pasivní složka síly F_p . Tato složka při podélném soustružení plní funkci přísuvu a tím pádem tlačí na obrobek a ovlivňuje tak tuhost soustavy S-N-O, a především přesnost rozměrů,

drsnost a kvalitu povrchu obrobku. Hlavně podle této složky se omezují a optimalizují řezné parametry obrábění. Posuvová složka síly F_f působí v axiálním směru, tudíž ve směru osy obrábění, kolmo na směr tangenciální i radiální složky a používá se na nastavení posuvových mechanismů. Poměr velikostí jednotlivých složek sil je určen zvolenou technologií obrábění, geometrií a materiálem řezného nástroje, řeznými podmínkami a řezným prostředím.^{4,17}

Ostří řezného nástroje vyvolává proces oddělování třísky za působení síly řezání F . Působením této síly musí být překonán řezný odpor R obráběného materiálu, vzniklý stavem napjatosti v obráběném materiálu. Při zkoumání poměru sil je zapotřebí vycházet z podmínek rovnováhy sil:⁴

$$F = -R \text{ [N]}$$

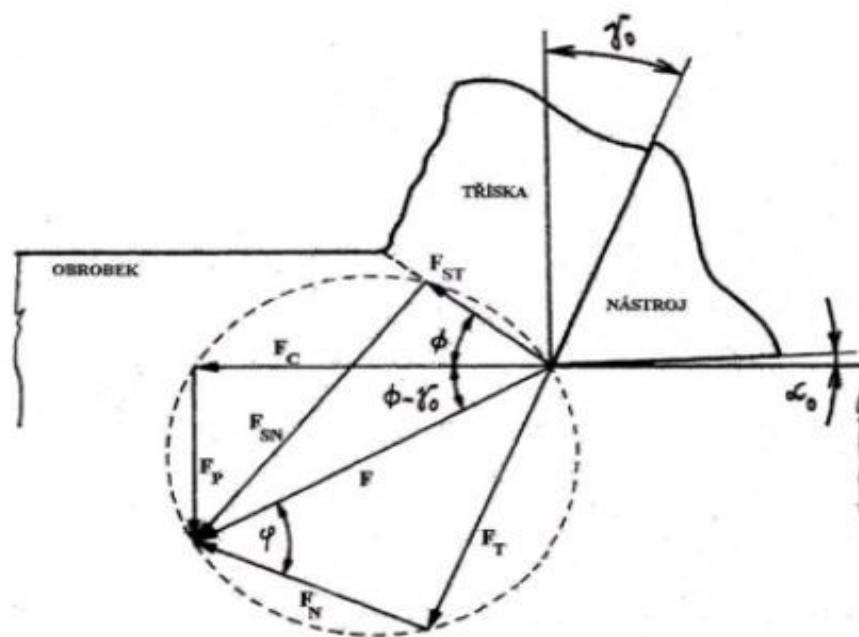
2.3



Obrázek 2.3 – Síly při řezání (obrábění)⁴

Následkem řezání materiálu (obrábění) jsou velké tlakové a smykové síly, působící v rozdílných směrech. Z tohoto důvodu se síla rozkládá do jednotlivých složek, kvůli kterým je možné určit velikost a směr výslednice sil. Celkovou řeznou sílu je možné rozložit s ohledem na hlavní a vedlejší řezný pohyb na aktivní složku řezání F_1 a na řeznou složku pasivní F_2 . Aktivní složka řezání se rozkládá ještě na řeznou složku síly F_c a posuvovou složku síly F_f , zatímco pasivní složka F_p síly se již nerozkládá. Při rozložení sil dle Merchanta pro ortogonální řezání, jsou všechny složky síly vyneseny z bodu špičky nástroje viz obrázek 2.4 kde F_{ST} je tečná složka a F_{SN} normálová složka síly v rovině maximálních smykových napětí.

^{17,18}



2.4 - Rozložení sil podle Merchanta ¹⁸

S rostoucí hodnotou posuvu a hloubky řezu mají složky řezné síly F_C , F_f , F_p stoupající tendenci. Nejen tyto řezné podmínky, ale taky řezná rychlost ovlivňuje všechny tři složky síly stejnou měrou a její vliv na měrný řezný odpor je analogický s vlivem na řezné síly. Výsledkem rostoucí řezné rychlosti je snížení měrného řezného odporu, při předpokladu že se vlivem působení teploty nemění mechanické vlastnosti obrobku a že se netvoří nárůstek. S rostoucí řeznou rychlostí se zmenšuje oblast primární plastické deformace, zmenšuje se řezný odpor a síla řezání má rostoucí tendenci. ^{4,17}

3. NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL

3.1 MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL A JEJICH SLOŽEK

Měření a analýza řezného silového působení se provádí za účelem optimalizovat technologické podmínky obrábění. Jak je již výše uvedeno, musíme vycházet z podmínek rovnováhy sil. Při zkoumání silových poměrů v praxi jde o přímé a nepřímé stanovení řezné síly, složek řezných sil a momentů působících při odlišných pracovních podmínkách. Přímé stanovení síly je měření řezných složek sil a jejich momentů, které využívá dynamometrů pro měření deformací a namáhání soustavy S-N-O.

Řezný nástroj je při měření řezných sil upnut do dynamometru, který reaguje na zatížení, vyvolané působením sil a momentů, vytvořením elektrického signálu, odpovídajícímu velikosti působící síly. Nejvyšší požadavky jsou u dynamometrů kladeny na

citlivost, tuhost konstrukce snímače, nízkou odchylku, linearitu a vysokou frekvenční odezvu. Citlivost dynamometru je určena poměrem elektrického a silového výstupu, tuhost konstrukce zaručuje, že se jednotlivé složky sil navzájem neovlivňují. Při obrábění zaznamenávají dynamometry veškeré podmínky vzniklé na řezném nástroji vlivem dynamického zatížení. Dynamometr musí v průběhu měření zaručit nezávislost měřící veličiny na jeho provozních vlastnostech, schopnost měřit veličiny v plném požadovaném rozsahu, s maximální přesností a stálostí i v závislosti na čase. Podle použité metody měření a z hlediska konstrukčního uspořádání se dynamometry dělí na:¹⁷

- Pružné (elektrický, mechanický, pneumatický, indukční, kapacitní),
- Stacionární (**piezoelektrický**, hydraulický, uhlíkový)

Dále se dělí na:

- Jednosložkové
- **Vícesložkové** (umožňují měření většího počtu složek sil a kroutících momentů)

3.2 VOLBA DYNAMOMETRU

Pro měření složek řezných sil a silových poměrů, při obrábění korozivzdorné oceli 17 349 byl pro experimentální obrábění zvolen třísložkový piezoelektrický dynamometr od firmy KISTLER s označením 9129AA s multikanálovým zesilovačem s označením 5070A a se zařízením pro sběr dat KISTLER 5697.

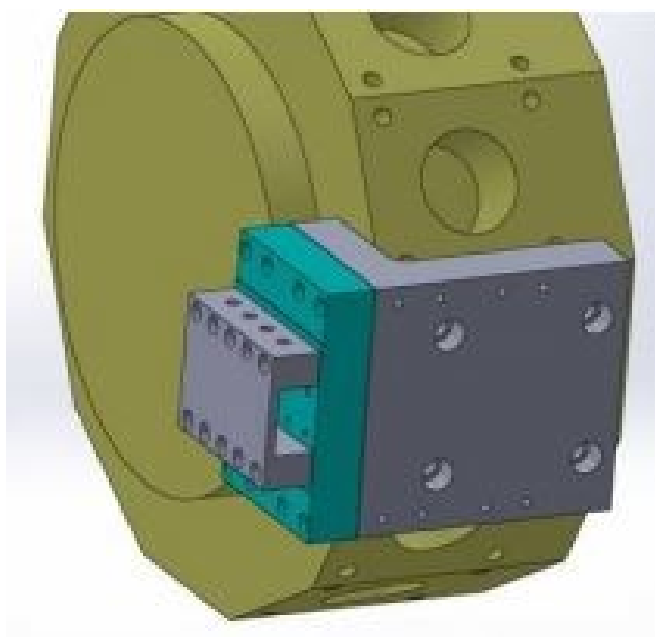


Obrázek 3.1 – Dynamometr KISTLER 9129AA, multikanálový zesilovač KISTLER 5070A a zařízení pro sběr dat KISTLER 5697 ²¹

V současnosti patří piezoelektrické dynamometry mezi nejpoužívanější snímače pro měření silového zatížení. Tento dynamometr umožňuje měření ve 3 navzájem kolmých složkách. Je zkonstruován za použití čtyř třísložkových měřících elementů z křemenných

krystalů, které jsou umístěny ve formě výbrusů do zásobníku. Tím je dosaženo velmi tuhé konstrukce zařízení o vysoké frekvenci, a lze měřit i velmi rychlé změny složek sil. ^{6,20}

Pomocí třísložkového piezoelektrického dynamometru KISTLER 9129AA bylo provedeno měření silového zatížení soustavy, při podélném soustružení korozivzdorné oceli 17 349. Dynamometr byl při experimentu upnut do speciálně upraveného držáku v revolverové hlavě. Na těleso dynamometru byl následně pomocí držáku upnut soustružnický nástroj. Měřily se tři hlavní na sebe kolmé složky síly v osách x, y, z, a to řezná složka síly F_c , posuvová složka síly F_f a pasivní složka síly F_p . K dynamometru byl pomocí optického kabelu připojen multikanálový zesilovač KISTLER 5070A, který přivádí milivoltaické napětí do systému pro sběr dat KISTLER 5697. Pomocí propojovacího kabelu byl systém pro sběr dat propojen s PC sestavou. Systém DynoWare, taktéž od firmy KISTLER nainstalovaný v PC sestavě se postaral o zpracování výsledku silového zatížení soustavy.



Obrázek 3.2 – Zakreslení upnutí dynamometru v revolverové hlavě ¹⁷

Při měření bylo pomocí dynamometru zapsáno do zařízení pro sběr dat nepřeberné množství dat, které obsahovaly informace o jednotlivých složkách sil v osách x, y a z. Tyto hodnoty jednotlivých složek byly při každém úběru materiálu převáděny přes software DynoWare do grafů, anebo je bylo možné přepsat do textových souborů. Textové soubory pak byly pomocí programu MS Excel převedeny a formátovány do přehledných tabulek. Z tabulek pak byly vytvořeny grafy. Každý graf je porovnáním řezných sil u jednotlivých VBD.

3.3 VOLBA OBRÁBĚCÍHO CENTRA

Pro experiment porovnání řezných sil při podélném soustružení byl zvolen stroj s vysokým výkonem a vysokou tuhostí konstrukce, a to soustruh od firmy Kovosvit MAS, který nese označení S 80i. Tento stroj splňuje veškeré požadavky a nároky pro obrábění nerezového materiálu 17 349, zajišťuje maximální tuhost i stabilitu rychlosti při obrábění. Tuhost má vliv hlavně na výkon obrábění, ale také na jakost obrobených ploch. Stroj disponuje řídicím CNC systémem a dvanáctipolohovou nástrojovou hlavou. Jeho vřeteno je poháněno od motoru hlavního pohonu s integrovanou dvoustupňovou převodovkou řemenovým převodem. Maximální průměr při obrábění na tomto horizontálním soustruhu je 465mm a maximální výkon motoru je stanoven na 20,5kW. Soustruh umožňuje plynule měnit otáčky a udržovat konstantní řeznou rychlost. Při porovnávání sil byl obráběn materiál z nerezové oceli s označením 17 349, o průměru 100mm. Obráběný materiál byl upnut ve sklíčidle o maximálně 3800 ot/min. Tento soustruh společně s dynamometrem a veškerými potřebnými prvky pro měření byly k dispozici ve firmě Dormer Pramet s.r.o., a veškeré měření tedy proběhlo v Šumperku, v místě sídliště této firmy.



Obrázek 3.3 - Soustružnický stroj Kovosvit MAS S80i

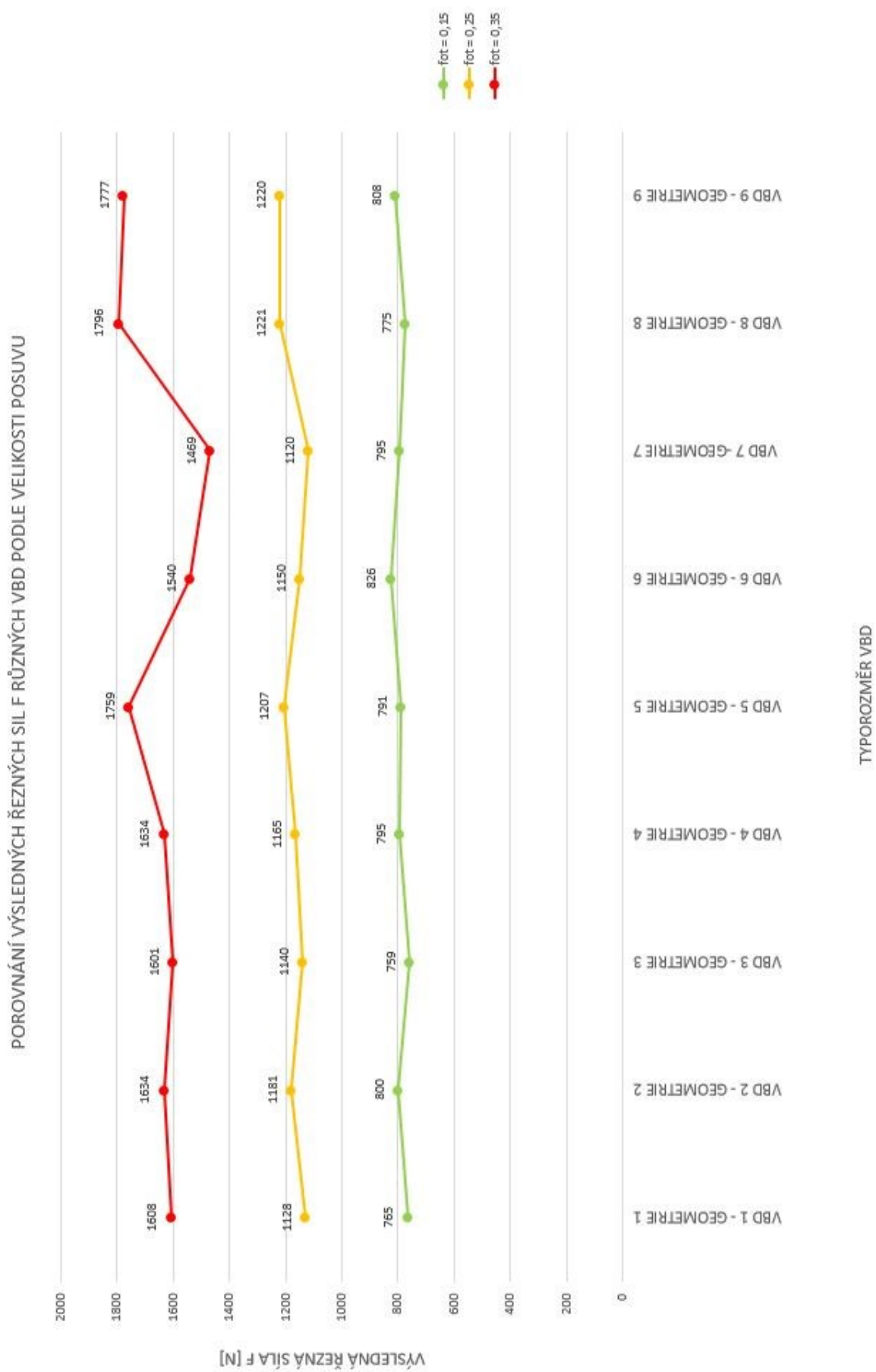
4. DISKUZE EXPERIMENTŮ

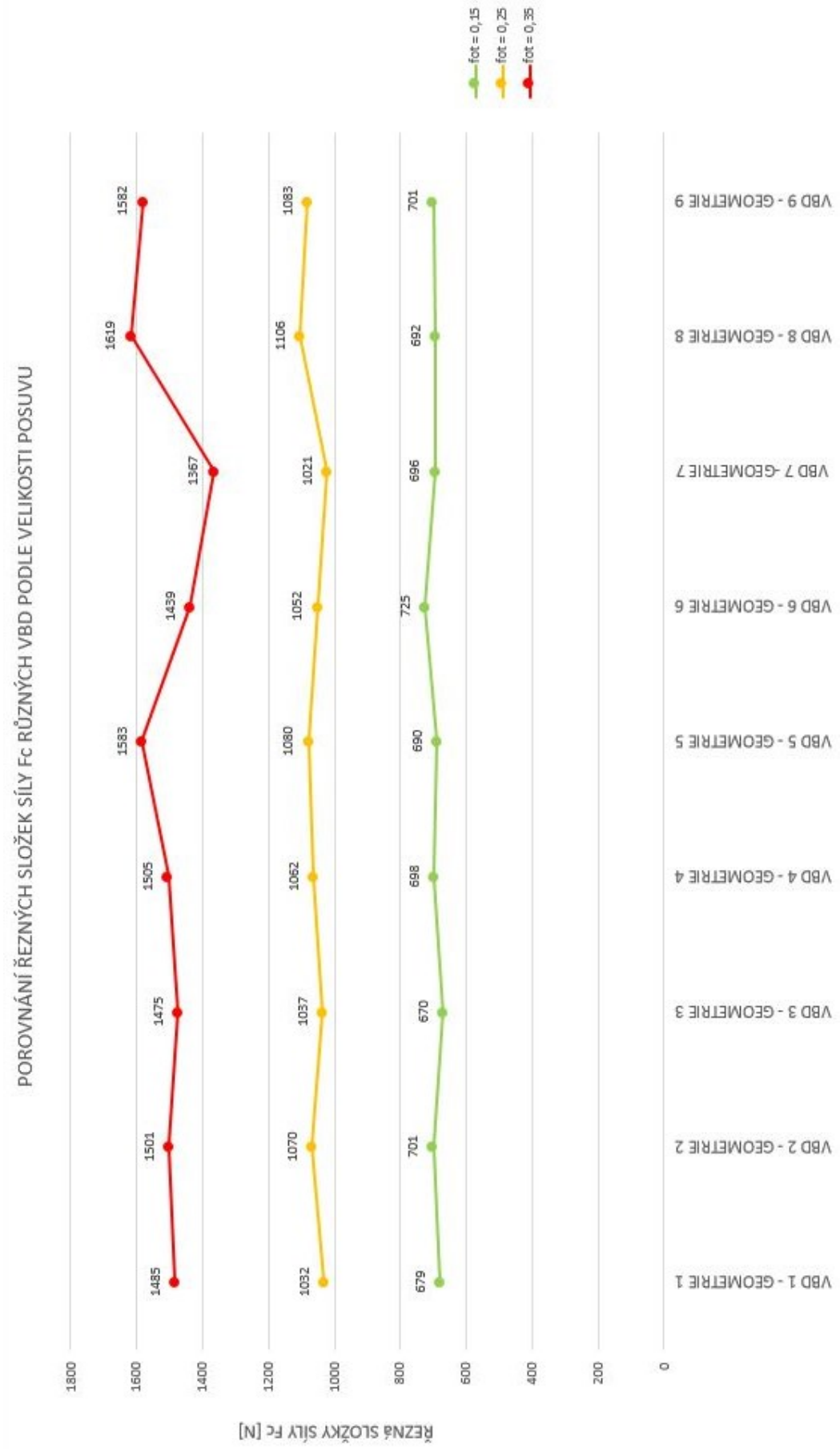
Výstupem našeho experimentu je tabulka průměrných hodnot naměřených složek řezných sil, závislých na posuvu pro 9 zkoumaných utvařečů. Z výsledků měření jednotlivých složek síly jsem vypočítal výslednou řeznou sílu matematickým výpočtem. Dále byla dopočtena hodnota výkonu a kroutícího momentu.

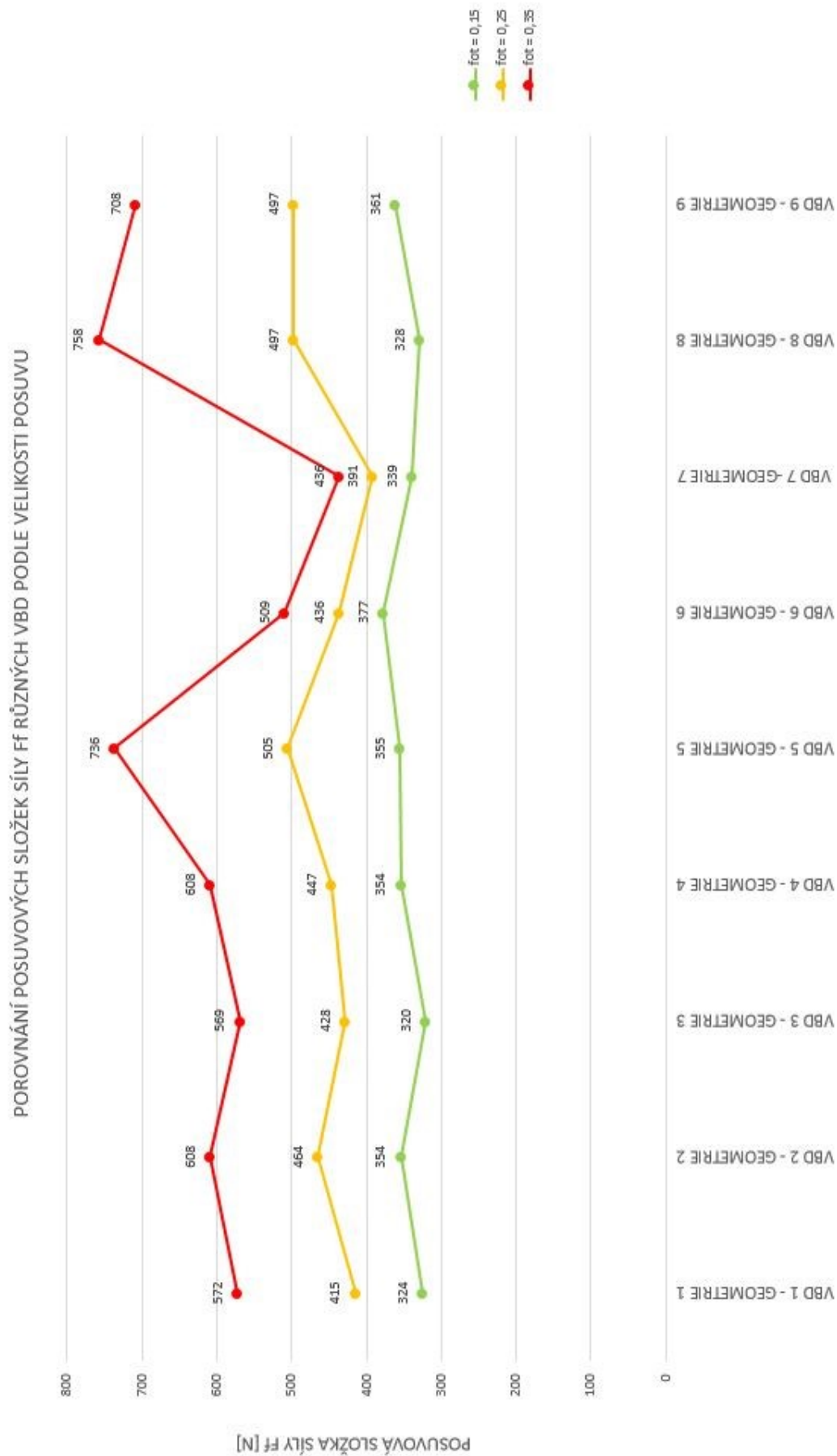
TABULKA 4.1 - NAMĚŘENÉ HODNOTY ŘEZNÝCH SIL A JEJICH SLOŽEK						
OBRÁBĚNÝ MATERIÁL - 17 349			ÚHEL = 95°	ŘEEZNÁ RYCHLOST $v_c = 120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
SOUSTRUŽENÝ PRŮMĚR - $D = 100 \text{ mm}$				HLOUBKA ŘEZU - $a_p = 2$		
POSUV ZA OTÁČKU - f_{ot}	POSUVOVÁ SLOŽKA SÍLY - $F_f \text{ [N]}$	PASIVNÍ SLOŽKA SÍLY - $F_p \text{ [N]}$	ŘEZNÁ SLOŽKA SÍLY - $F_c \text{ [N]}$	VÝSLEDNÁ ŘEZNÁ SÍLA - $F \text{ [N]}$	KROUTÍCÍ MOMENT – $M_k \text{ [N} \cdot \text{m]}$	VÝKON P [kW]
VBD 1 - GEOMETRIE 1						
0,15	324	141	679	765	34	1,4
0,25	415	185	1032	1128	52	2,1
0,35	572	233	1485	1608	74	3,0
VBD 2 - GEOMETRIE 2						
0,15	354	150	701	800	35	1,4
0,25	464	185	1070	1181	54	2,1
0,35	608	217	1501	1634	75	3,0
VBD 3 - GEOMETRIE 3						
0,15	320	156	670	759	34	1,3
0,25	428	204	1037	1140	52	2,1
0,35	569	253	1475	1601	74	3,0
VBD 4 - GEOMETRIE 4						
0,15	354	139	698	795	35	1,4
0,25	447	169	1062	1165	53	2,1
0,35	608	187	1505	1634	75	3,0
VBD 5 - GEOMETRIE 5						
0,15	355	151	690	791	35	1,4
0,25	505	188	1080	1207	54	2,2
0,35	736	215	1583	1759	79	3,2
VBD 6 - GEOMETRIE 6						
0,15	377	122	725	826	36	1,5
0,25	436	163	1052	1150	53	2,1
0,35	509	206	1439	1540	72	2,9

POSUV ZA OTÁČKU - f_{ot}	POSUVOVÁ SLOŽKA SÍLY - F_f [N]	PASIVNÍ SLOŽKA SÍLY - F_p [N]	ŘEZNÁ SLOŽKA SÍLY - F_c [N]	VÝSLEDNÁ ŘEZNÁ SÍLA - F [N]	KROUTÍCÍ MOMENT – M_k [N·m]	VÝKON P [kW]
VBD 7 -GEOMETRIE 7						
0,15	339	179	696	795	35	1,4
0,25	391	244	1021	1120	51	2,0
0,35	436	313	1367	1469	68	2,7
VBD 8 - GEOMETRIE 8						
0,15	328	117	692	775	35	1,4
0,25	497	144	1106	1221	55	2,2
0,35	758	171	1619	1796	81	3,2
VBD 9 - GEOMETRIE 9						
0,15	361	178	701	808	35	1,4
0,25	497	264	1083	1220	54	2,2
0,35	708	390	1582	1777	79	3,2

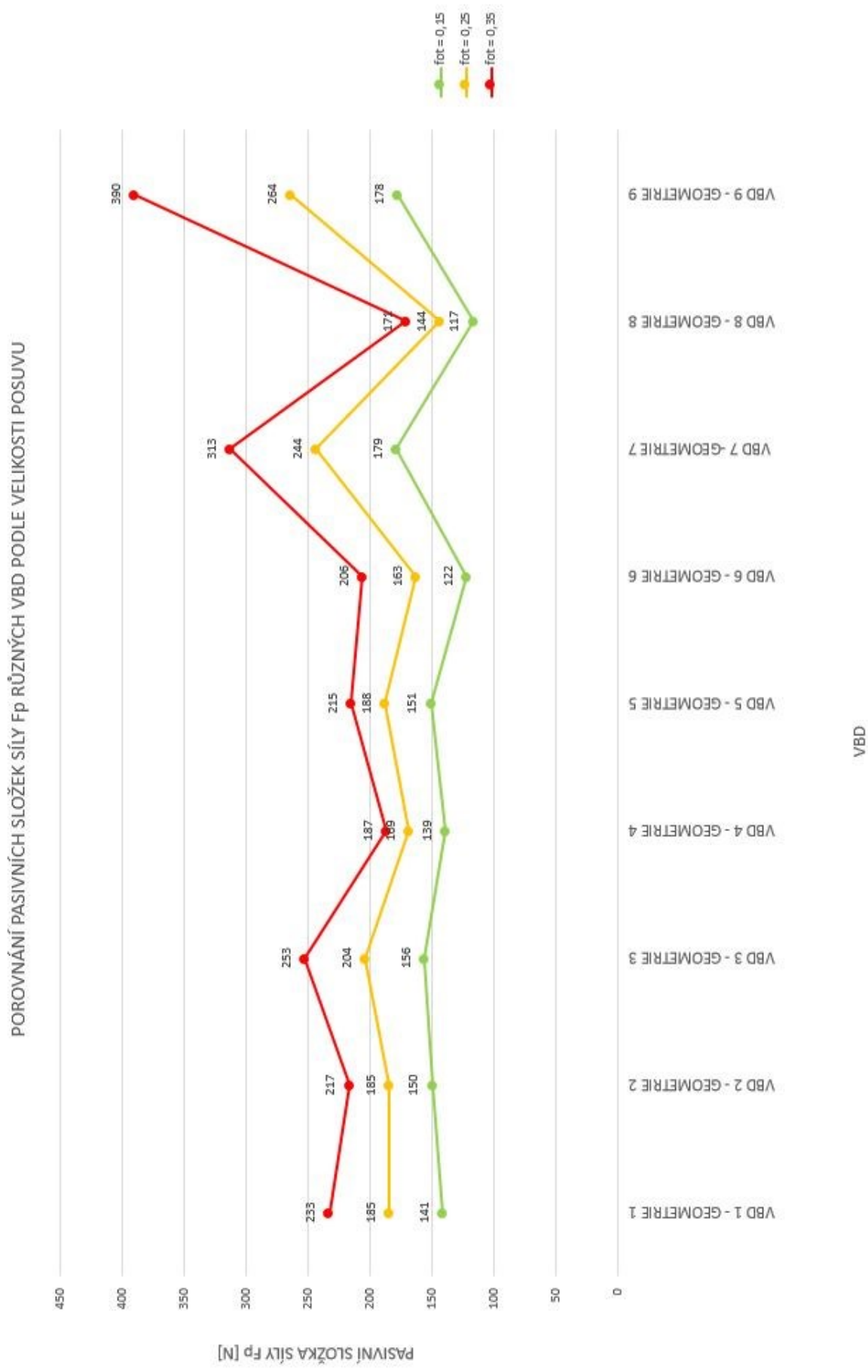
V programu excel jsem po výpočtu všech potřebných hodnot vytvořil z jednotlivých řezných složek sil grafy, pro porovnání silového zatížení jednotlivých utvařečů. Nejdříve jsem porovnal výsledné řezné síly F pro jednotlivé destičky a postupně potom pro různé, předem určené posuvy. Dále jsem porovnával řezné složky síly F_c , posuvové složky síly F_f , a nakonec pasivní složky síly F_p . V těchto grafech je přehledně viditelné, který utvařeč třísky je nejvhodnější, to znamená že má nejnižší silové zatížení, a naopak který je svým silovým zatížením nevyhovující.







TYPOVZMĚR VBD



5. TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Z grafu porovnání výsledných řezných sil F , kde jsme zkoumali devět různých utvařečů vyměnitelných břitových destiček, jsou zřejmé průměrné hodnoty naměřených řezných sil pro jednotlivé VBD, při třech různých hodnotách posuvu f_{ot} . Čím je hodnota velikosti řezných sil nižší, tím jsou vlastnosti daného utvařeče lepší.

Při hodnotě posuvu 0,15 mm/ot byla nejvyšší hodnota silového zatížení naměřena pro utvařeč VBD 6 o velikosti 826N. Naopak nejnižší hodnota 759N byla zjištěna u VBD 3, což je téměř osmiprocentní rozdíl. Podobné silové zatížení bylo změřeno ještě u VBD 1 a VBD 8, kde rozdíl hodnot nepřesáhl dvě procenta.

U hodnoty posuvu 0,25 mm/ot vykazoval nejlepší vlastnosti utvařeč VBD 7, ale jeho hodnota byla téměř stejná s hodnotou VBD 1 a podobná hodnotě silového zatížení VBD 3. Všechny tři měly o více než šest a půl procenta nižší silové zatížení než VBD 8 a VBD 9.

Posuv 0,35 mm/ot byly zjištěny o téměř 17% nižší silové účinky u VBD 7 než u VBD 8. Utvařeče VBD 5, VBD 8 a VBD 9 prokázali jednoznačně nejhorší vlastnosti při obrábění většími posuvy.

Pro kombinované velikosti posuvů bych doporučil použití VBD 7, nebo VBD 3. Při použití za nižších hodnot posuvů bych však použil VBD 3 nebo VB 1. Při hrubovacích operacích bych použil utvařeč VBD 6 a VBD 7. Utvařeče s nejlepšími komplexními vlastnostmi jsou tedy podle mého VBD 1, VBD 3 a VBD 7.

Nejsem schopen určit nejvhodnější variantu zvolenou pro pořízení, jelikož si firma nepřeje zveřejnění cenových údajů. Tudíž není ani možné porovnání ekonomických údajů s technickými.

6. ZÁVĚR

V současnosti se stále zvyšují požadavky na řezivost a trvanlivost nástrojů. Jak bylo v předchozích kapitolách uvedeno, řezné síly působící na vyměnitelné břitové destičky při procesu obrábění jsou velmi důležitým aspektem ovlivňujícím zejména trvanlivost břitu v průběhu řezného procesu. Zkoumání těchto sil je důležité především pro optimalizaci tvaru utvařeče třísky, ale taky pro zefektivnění obráběcího procesu. Vzhledem k mnoha faktorům působících při procesu obrábění, jako jsou obrobiteľnosť, mechanické a tepelné zatížení atd. jsou zvýšené požadavky nejen na nástroje a řezný materiál, ale taky na optimalizaci jednotlivých technologií a řezných podmínek.

Cílem této práce bylo popsat obráběný materiál, vlastnosti a úpravy řezného materiálu, rozebrat problematiku řezných sil, a hlavně porovnat řezné síly jednotlivých utvařečů vyměnitelných břitových destiček u pozitivních geometrií, pro firmu Dormer Pramet s.r.o. Toto porovnání bude sloužit firmě jako podklad pro další zpracování. Pro celkové hodnocení je ještě potřeba doplnit odolnost vůči nepříznivým záběrovým podmínkám, což jsou zkoušky, které budou následovat po vyhodnocení řezných sil.

Experiment měření řezných sil byl proveden pomocí dynamometru, zesilovače, zařízení pro sběr dat a PC systému DynoWare, vše od firmy KISTLER a pomocí CNC soustruhu Kovosvit MAS S80i. Byly naměřeny hodnoty, z kterých se vypočítal průměr a ty se pak dosadili do tabulek. Z těchto údajů se potom vyhodnotili grafy, které přehledně srovnávají silová zatížení při jednotlivých hodnotách posuvu pro jednotlivé utvařeče VBD.

Při vyhodnocení experimentální části se prokázali nejlepší vlastnosti utvařečů testovaných vzorků VBD. Za nejlepší vlastnosti utvařeče lze v našem případě považovat co nejnižší silové zatížení VBD. Účinky silového zatížení lze korigovat správnou volbou geometrie nástroje, řezných parametrů, řezného média a správnou volbou kombinace nástrojového a obráběného materiálu.

Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat firmě Dormer Pramet, s.r.o., za umožnění vypracování mé bakalářské práce, a to především panu Ing. Romanovi Maršíčkovi za jeho ochotu, trpělivost a vstřícný přístup při společných konzultacích.

Velké díky rovněž patří panu doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. za jeho odborné vedení, užitečné rady a důležité připomínky vztahující se k bakalářské práci.

7. SEZNAM POŽITÉ LITERATURY

- [1] MRKVICA, I.; MORAVEC, V.: *Úpravy břitů a povrchů řezných nástrojů*. [online] [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/upravy-britu-a-povrchu-reznych-nastroju.html>>
- [2] ZETEK, M.; ZÍDKOVÁ, H.; ČESÁKOVÁ, I.: *Vliv tvaru řezné hrany nástroje na průběh řezného procesu*. [online] [cit. 2019-02-15] Dostupné z: <http://www.mercel.cz/mercelcz_files/drsnost_povrchu.pdf>
- [3] HUMÁR, A.: *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008, 235 s. IBSN 978-80-254-2250-2.
- [4] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J.: *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na: <<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>> ISBN 978-80-248-1505-3.
- [5] AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cuting – A Practical Handbook*. ISBN 91 -97 22 99-4-6
- [6] Dormer Pramet s.r.o., Interní materiály. 2018
- [7] Trendy v povlakování slinutých karbidů, MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>>
- [8] Současnost a trendy povlakování technologií PVD, MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>>
- [9] OTEC PRÄZISIONSFINISH GERMANY. The importance of cutting edge preparation in metal cutting technology. [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <<https://www.slideserve.com/roy/the-importance-of-cutting-edge-preparation-in-metal-cutting-technology-presented-by>>
- [10] RIGAKU MECHATRONICS. Sputtering systems. [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <<https://en.rigaku-mechatronics.com/case/sputtering-systems.html>>
- [11] PATRICK DE VOS.: *Příručka pro technology: Proces obrábění kovů - vliv geometrie*. [Online] [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-kovu-vliv-geometrie.html>>
- [12] VASILKO, K. a kol. 2006. *Top trendy v obrábění III. část-Technológia obrábania*. Žilina: MEDIA/ST, 2006, 214.
- [13] Geometrie soustružnického nože, Eluc [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1219>>

- [14] HUMÁR, A. Technologie I. – Technologie obrábění – 1. část, studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003, s. 138.
- [15] CORTÉS RODRÍGUEZ, C. J. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. Kassel: kassel university press GmbH, 2009, 189 s. ISBN 978-3-89958-712-8.
- [16] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M. Diagnostika stavu řezného břitu po mikroupravách. In: Transfer inovací. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2011. s. 74-78., ISSN: 1337-7094
- [17] ZLÁMAL, T. Příspěvek k obrábění Ni superslitiny a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů. Ostrava, 2015, 108 s. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [18] SZLAUR, V. Analýza procesů obrábění kovových materiálů se zaměřením na energetické aspekty. Brno, 2012, 56 s. Diplomová práce. VÚT – Brno
- [19] HUMÁR, A. Technologie I. – Technologie obrábění – 1. část, studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003, s. 138.
- [20] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. Technologie II – 1. díl. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978–80–248–1641–8
- [21] KISTLER GROUP. 2009. Cutting Force Measurement. Soubor v PDF. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <<https://www.kistler.com/?type=669&fid=79377&model=document>>, <<https://www.kistler.com/?type=669&fid=77660&model=document>>